
	<p><b>VŠB - Technická univerzita Ostrava</b> Fakulta elektrotechniky a informatiky</p> <p><b>Katedra elektrických strojů a přístrojů</b></p>	
---	--	---

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

# **Konstrukce polovodičového laseru**

# **Construction of semiconductor laser**

**2009/2010**

**Bc. Ondřej Tureček**

**Seznam použitých symbolů a značek:**

<i>symbol</i>	<i>název</i>	<i>jednotka</i>
$I$	Elektrický proud	(A)
$U$	Elektrické napětí	(V)
$P$	Výkon	(W)
$f$	Frekvence	(Hz)
$R$	Odpor	( $\Omega$ )
$c$	Rychlost světla	(km/h)
$\lambda$	Vlnová délka	( nm )
$L$	Jas	( cd/m <sup>2</sup> )
$lx$	Osvětlení	(lx)
$\Phi$	Světelný tok	(lm)
$K(\lambda)$	Světelná účinnost	( lm/W )
$I$	Svítivost	(Cd)

## Obsah

Úvod.....	1
1. Seznámení s problematikou .....	3
2. Světlo .....	4
2.1 Viditelné světlo .....	4
2.2 Šíření světla.....	4
2.3 Zakřivení .....	4
2.4 Rychlost světla .....	5
2.5 Absorpce světla.....	5
2.6 Interference .....	5
2.7 Barva a vlnová délka.....	5
3 Měření světla: .....	6
3.1 Jas (nebo teplota) .....	6
3.2 Osvětlení .....	6
3.3 Světelný tok .....	7
3.4 Svítivost .....	8
3.5 Amplituda .....	8
3.6 Polarizace.....	9
3.7 Zdroje světla .....	9
4. Laser.....	9
4.1 Rozdělení laserů.....	10
4.2 Oblasti použití laserů .....	10
4.3 Historie a objev laseru .....	10
4.4 Stručně fyzikální princip laseru .....	11
4.5 Praktická konstrukční řešení laseru .....	12
4.6 Aplikace a užití laseru.....	13
4.7 Průmyslové využití laserového ohřevu.....	14
5. Polovodičové lasery .....	14
5.1 Princip funkce laserových diod.....	14
5.2 Přehled jednotlivých typů laserových diod.....	17
6. Pouzdření laserových diod.....	23
7. Napájení laserových diod.....	25
8. Konstrukce jednoduchého polovodičového laseru .....	29
8.1 Konstrukční řešení jednoduchého polovodičového laseru .....	29
8.1.1 Optická část.....	30
8.1.2 Složení optické části polovodičového laseru .....	30
8.2 Složení laserového polovodičového modulu .....	31

8.2.1 Laserová dioda .....	31
8.2.2 Dichrozrcátko.....	32
8.2.3 Polarizační kostka .....	33
8.2.4 Lasorb .....	34
8.2.5 Kolimátor .....	35
8.3 Elektronická část laseru .....	35
8.3.1 Proudový zdroj.....	35
8.3.2 Driverová deska .....	36
8.3.3 Deska pro ovládání stepper motorků .....	36
8.3.4 Stepper motorky.....	36
8.3.5 Chlazení laseru.....	37
8.4 Ovládání polovodičového laseru .....	39
8.4.1 Ovládání pomocí integrovaného mikrofonu .....	39
8.4.2 Ovládání pomocí protokolu DMX.....	39
8.4.3. Ovládání pomocí ILDA převodníků .....	40
9. Laser show bezpečnost .....	40
9.1 Základní principy bezpečnosti dle ILDA.....	41
10. Realizace konstrukce vlastního laseru .....	43
10.1 Nový způsob jištění stepper motorků .....	44
10.2 Výměna laserového zeleného modulu za nový.....	45
10.3 Integrace druhého laserového modulu do zařízení .....	46
10.4 Uvedení zařízení na trh .....	48
11. Návrh prototypu plně outdoorového laseru .....	49
12. Závěr .....	50

## Úvod

Viditelné světlo je typ elektromagnetického záření, jenž se pohybuje na vlnové délce 400–750 nm. Rozsah vlnových délek světla leží mezi hodnotami ultrafialového záření a infračerveného záření. Ve specifických oblastech vědy a techniky může být světlem chápáno i elektromagnetické záření o libovolné vlnové délce. Třemi základními hodnotami světla jsou definovány svítivost (amplituda), barva (frekvence) a polarizace (úhel vlnění).

Laser je zařízení, které využívá principu zesílení světla pomocí vynucené emise záření. Je to speciální zařízení, které v současné době prochází neustálým dynamickým vývojem, ale přesto se s ním setkáváme v každodenním životě a v dnešní době se stal již nepostradatelnou součástí řady automatizovaných i neautomatizovaných systémů. Jeho využití je známo i v každodenním osobním využití například u CD přehrávačů, tiskáren, ukazovátek a jiných personálních zařízení. Toto bezesporu rozsáhlé využití principu stimulované emise záření je velmi rozsáhlé a proto se má práce věnuje konkrétně polovodičovému efektovému laseru.

Tématem této diplomové práce je konstrukce polovodičového efektového laseru a popis jeho základní funkce. Důvodem výběru tohoto tématu je dlouhodobý zájem o tuto problematiku, mé profesní využití znalostí problematiky v budoucnosti a také přínos mých znalostí z praktického využití pro vývoj jednoduchých systémů.

V první části práce seznamuje se světlem jako energií, fyzikální veličinou a s lidským vnímáním světla. Důležité informace o tomto elektromagnetickém záření jsou popsány v jednotlivých segmentech a není zapomenuto na jejich popis.

První sekce diplomové práce také obsahuje měření a popis jednotek světla. Dále zde nechybí historie vývoje laseru od jeho prvopočátků, přes vývoj a aktuální trendy. Práce také obsahuje rozbor funkce a popis základních součástí.

V druhé části se práce zaměřuje na rozdělení laserů z různých hledisek. Jak konstrukčních, tak sekčních. Po rozdělení jsou zde vysvětleny jednotlivé principy, dále také charakteristiky, důležité parametry a atributy, podle kterých se řídí výrobci na celém světě. Spotřebitel, který si výrobek zakoupí od výrobce, se pak také orientuje podle těchto parametrů.

Třetí část pojednává o základní konstrukci polovodičového laseru a popis jeho funkce. Laserové projekční zařízení je zde rozděleno na dvě základní části, které jsou důkladně popsány a vysvětleny po bodech tak, aby bylo zřejmé jak laser funguje.

Čtvrtá část se věnuje konstrukci konkrétního zařízení, spolu navrhnutého autorem této diplomové práce a společností Kvant Ltd. – světově uznávaného výrobce nejen efektových polovodičových laserů. V této sekci práce je uvedena zmínka o postupném vývoji nového typu outdoorového laseru navrhnuté na principu chlazené Peltierovými články.

V závěrečné části jsou zhodnoceny výsledky konstrukce zařízení a popis uvedení výrobku na trh.

## 1. Seznámení s problematikou

Trh s polovodičovými efektovými - grafickými lasery je velmi specifický a je zaměřen na dva typy klientů. Masovější část klientely pochází z klubového, diskotékového a amatérského zábavního průmyslu. Ta druhá, náročnější, nikoliv tak masová je jednoznačně televizního, touringového, koncertového a profesionálního charakteru. Proto i výrobci polovodičových efektových laserů nabízí řešení pro obě skupiny klientů.

Na světovém trhu se pohybuje přibližně dvacítká věhlasných výrobců efektových laserů, které zaručují kvalitu, servis, záruku a spolehlivost. Jejich pověst v oboru často potvrzuje jejich skutečné kvality a dovednosti.

Dále jsou ale na trhu také firmy, jejichž firemní jméno není tak věhlasné a své výrobky obvykle vyrábějí v asijských zemích. Cena těchto laserů je často pětínová, někdy i mnohem nižší. Parametry těchto laserů však podle výrobců dosahují úrovně svých značkových protějšků vyráběných v Evropě nebo Americe. Zákazník je tedy postaven před nelehkou volbu, zda investovat do kvalitních ověřených zařízení, nebo riskovat koupi mnohem levnější asijské kopie, která nemá certifikovanou zaručenost životnosti diody popřípadě asijského výrobku.

Předmětem této diplomové práce ovšem není porovnání kvalit mezi značkovými a neznačkovými lasery, popřípadě srovnání hobby disco laseru s profesionálním touringovým zařízením, nicméně tématem je konstrukce polovodičového efektového laseru.

Proto jsem se rozhodl ve spolupráci s jedním z předních světových výrobců efektových laserů zkonstruovat takové zařízení, aby kvalitou laserové diody dosahovalo předností světových značek.

Volba jakým způsobem postupovat byla zřejmá. Požadavky byly stanoveny poptávkou trhu z kategorie klubových klientů. Zařízení musí být spolehlivé, výkonné, energeticky úsporné, musí mít dlouhou životnost, jednoduchou obsluhu, srozumitelný plně soběstačný základní servis a jeho cena by neměla přesáhnout 1000 Eur. Proto se autor zařízení odebral cestou integrace kvalitní laserové diody do opláštění jednoduchého původně led diodového inteligentního zařízení, konkrétně mini otočné hlavice čínského původu. Z tohoto zařízení se zachoval kryt, krokové motorky ovládající pohyby zařízení a upravená základní deska. Toto zařízení bylo následně typizováno a připraveno pro sériovou výrobu a stalo se nedílnou součástí aktuálního sortimentu nabízených produktů výrobce

efektivních laserů. Zařízení samozřejmě splňuje veškeré platné normy pro použití v Evropské unii.

## 2. Světlo

Abychom mohli přejít k problematice laserů samotných, měli bychom si nejdříve objasnit, co je to vlastně světlo, jak je definováno a jaké jsou jeho základní vlastnosti a značky.

### 2.1 Viditelné světlo

Viditelné světlo je složka elektromagnetického spektra o frekvenci  $3.8 \times 10^{14}$  Hz (hertz) až  $7.5 \times 10^{14}$  Hz, kde rychlost ( $c$ ), frekvence ( $f$  nebo  $\nu$ ), a vlnová délka ( $\lambda$ ) zachovávají vztah:  $\lambda = c/f$  a rychlost světla ve vakuu  $c$  je konstanta. V optice se také používá kruhová frekvence  $\omega$ , která je spojena s frekvencí  $f$  vztahem  $\omega = 2\pi f$ . Vlnová délka viditelného světla ve vakuu tedy je 400 nm až 800 nm.

Tudíž je tento rozsah viditelným světlem pro člověka. Některé druhy živočichů vnímají rozsah jiný - například včely jej mají posunut směrem ke kratším vlnovým délkám (ultrafialové záření), naopak někteří plazi vnímají i infračervené záření.

Rozsah vnímaných vlnových délek je dán především tím, že v oblasti viditelného světla je maximum elektromagnetického záření ze Slunce dopadajícího na zemský povrch, a tudíž je v tomto rozsahu nejlépe vidět.

### 2.2 Šíření světla

Dříve většina vědců věřila, že se světlo pohybuje spíše v krátkých vlnách, než jako částice letící jako střely. Dnes je rozšířena ta domněnka, že to může být oběma způsoby a že o světlu je pravděpodobně nejvhodnější přemýšlet jako o kmitajících dávkách energie.

### 2.3 Zakřivení

Paprsky světla se při přechodu z jednoho prostředí do jiného lámou, například když světlo dopadá šikmo na průhledný materiál, jako je sklo nebo voda. Různé materiály zpomalují světlo rozdílně, takže lom nastává vždy pod jiným úhlem.

### 2.4 Rychlost světla

Rychlost světla (nebo jiného elektromagnetického záření) ve vakuu je definována přesnou hodnotou 299 792 458 metrů za sekundu (1 079 252 848,8 km/h). Označuje se písmenem  $c$ .



Tato rychlost dává přirozený poměr měřítek prostoru a času a je nejvyšší možnou rychlostí šíření signálu či informace. Vzhledem k tomu, že samotná jednotka délky metr je určena jako vzdálenost, kterou světlo ve vakuu urazí za  $1/299\,792\,458$  sekundy, je hodnota rychlosti světla určená touto definicí přesná a přibližuje se velikosti rychlosti světla získané v minulosti měřeními s využitím staré definice metru. Rychlost světla v látkovém prostředí je menší než rychlost světla ve vakuu  $c$  a je rovna  $c/n$ , kde „ $n$ “ je index lomu příslušné látky (materiálu).

## 2.5 Absorpce světla

Když světlo narazí na povrch, část je pohlcena atomy povrchu daného předmětu, přičemž povrch se velmi slabě zahřeje. Každý druh atomu absorbuje určité vlnové délky (barvy) světla. Barva povrchu záleží na tom, které vlnové délky vstřebává a které odráží. List tedy je viděn jako zelený, protože absorbuje všechny barvy, kromě zelené, a my vidíme jen odražené zelené světlo.

## 2.6 Interference

K interferenci dochází, když se střetnou dvě vlny světla. Pokud se sejdou, pak se navzájem posílí. Tomu se říká pozitivní (též konstruktivní) interference a viděna je jako světlo jasné. Pokud nejsou shodné, pak mohou jedna druhou zrušit. To je negativní (destruktivní) interference a ta je vidět jako stín. Interferenční proužky (Fizeauovy proužky) jsou pruhy světla a stínu vytvořené střídavým zesílením a zeslabením skládajících se světelných svazků.

Pro interferenční maxima (konstrukt. interfer.) platí:  $2 \times n \times d = (m - 1) \times \lambda$

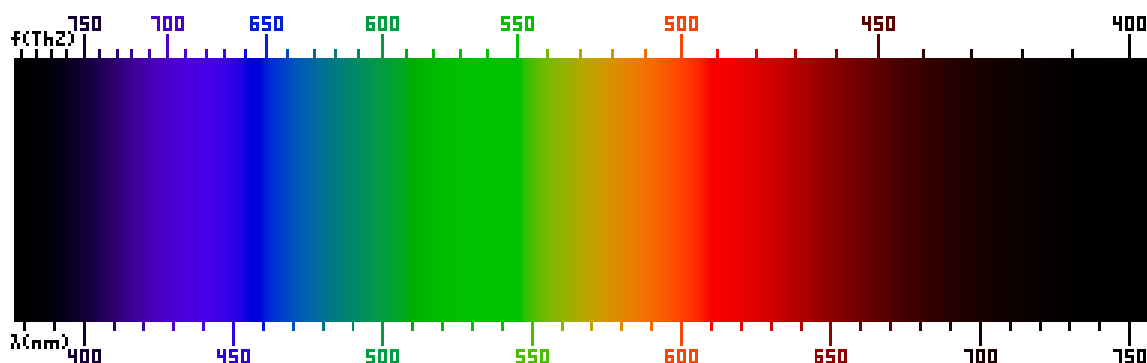
Pro interferenční minima (destrukt. interfer.) platí:  $2 \times n \times d = (2 \times m - 1) \times (\lambda / 2)$  kde  $d$  je nejkratší strana trojúhelníku,  $m$  je počet maxim (minim) –  $m = \{1, 2, 3, \dots\}$ ,  $n$  index lomu prostředí a  $\lambda$  symbolizuje vlnovou délku dopadajícího záření.

## 2.7 Barva a vlnová délka

Různé frekvence světla vidíme jako barvy, od červeného světla s nejnižší frekvencí a nejdelší vlnovou délkou po fialové s nejvyšší frekvencí a nejkratší vlnovou délkou.

Hned vedle viditelného světla se nachází ultrafialové (UV), směrem do kratších vlnových délek, a infračervené záření (IR), směrem do delších délek. Přestože lidé nevidí IR, mohou blízké IR cítit jako teplo svými receptory v pokožce. Ultrafialové světlo se zase na člověku projevuje zvýšením pigmentace pokožky, známým opálením.

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění, jenž ke svému šíření nepotřebuje žádné látkové prostředí (z toho vyplývá schopnost se šířit i vakuovým prostředím). Velikost rychlosti světla ve vakuu je  $c=299792458 \text{ m.s}^{-1}=3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .



Obr. 2.7.1 Barevné spektrum

### 3. Měření světla

Aby bylo možno porovnávat jednotlivé vlastnosti světla, je třeba rozeznávat jeho základní veličiny a ty musí být měřitelné.

#### 3.1 Jas (nebo teplota)

Jas je veličina, na kterou bezprostředně reaguje zrakový orgán. Označuje se  $L$  a udává se v  $\text{cd/m}^2$  (kandelách na  $\text{m}^2$ ), dříve označována názvem nit (nt).

Jas je podíl svítivosti ( $dI$ ) plošky zdroje v daném směru a průmětu této plošky do roviny

kolmé na daný směr ( $dS \cos \alpha$ ).

$$L = \frac{dI}{dS \cos \alpha}$$

#### 3.2 Osvětlení

Osvětlenost (též intenzita osvětlení nebo jen osvětlení) je fotometrická veličina vyjadřující světelný tok dopadající na určitou plochu. Je tedy podílem světelného toku (v lumenech) a plochy (v metrech čtverečních).

V případě bodového zdroje o svítivosti  $I$  a paprsků dopadajících pod úhlem  $\alpha$  k normále plochy, vzdálené od zdroje  $r$ , pak

Osvětlení je tedy nepřímo úměrné čtverci vzdálenosti a je tím slabší, čím šikměji paprsky dopadají.

Jednotkou osvětlení je lux (lx), což je osvětlení způsobené světelným tokem 1 lm dopadajícím na plochu 1 m<sup>2</sup>. Běžná hodnota osvětlení ve vnitřních prostorech se pohybuje v rozmezí 100–2000 lx, ve slunečný letní den na volném prostranství lze naměřit hodnoty větší než 70 tisíc lx (v zeměpisné šířce ČR). Jasná měsíční noc při úplňku představuje osvětlenost do 0,5 lx. Lidský zrak je natolik adaptabilní, že dokáže vnímat určité světelné podněty ještě při hladině 10<sup>-9</sup> lx, samozřejmě bez možnosti rozlišovat jakékoliv předměty; a naopak, člověk je schopen číst výrazný text při osvětlení zhruba 108 lx (pochopitelně za cenu výrazného nepohodlí).

### 3.3 Světelný tok

Světelný tok označuje světelnou energii, kterou zdroj vyzáří za časovou jednotku, tzn. 1s. Je to však energie posuzovaná z hlediska citlivosti oka na různé vlnové délky světla. Světelný tok je tedy fotometrická veličina.

Symbol veličiny:  $\Phi$

Základní jednotka: lumen, značka jednotky: lm

Výpočet:

Světelný tok  $\Phi$  monochromatického záření vlnové délky  $\lambda$ , jehož zářivý tok je

$\Phi_e$ , se určí podle vzorce  $\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda)$ ,

kde  $K(\lambda)$  je světelná účinnost monochromatického záření, která je rovna poměru světelného toku a jemu odpovídajícího zářivého toku, a  $V(\lambda)$  je poměrná účinnost záření (z hlediska pozorovatele totožné s poměrnou

spektrální citlivostí) a je definována  $V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m}$  (lm/W)

Maximum  $K_m$  bylo stanoveno při fotopickém vidění (ve dne) při vlnové délce  $\lambda = 555,155$  nm a jeho hodnota je 683 lm/W.

Stejně jako se pro fotopické vidění definují veličiny  $K(\lambda)$ ,  $K_m$  a  $V(\lambda)$ , definují se pro skotopické vidění (za tmy, v noci) veličiny , , a  $K'(\lambda)$ ,  $K'_{ma}$   $V'(\lambda)$ ..

Vlastnosti:

Z definice svítivosti vyplývá, že světelný tok bodového zdroje svítivosti  $I$  do prostorového úhlu  $d\Omega$  je definován vztahem  $d\Phi = I d\Omega$

### 3.4 Svítivost

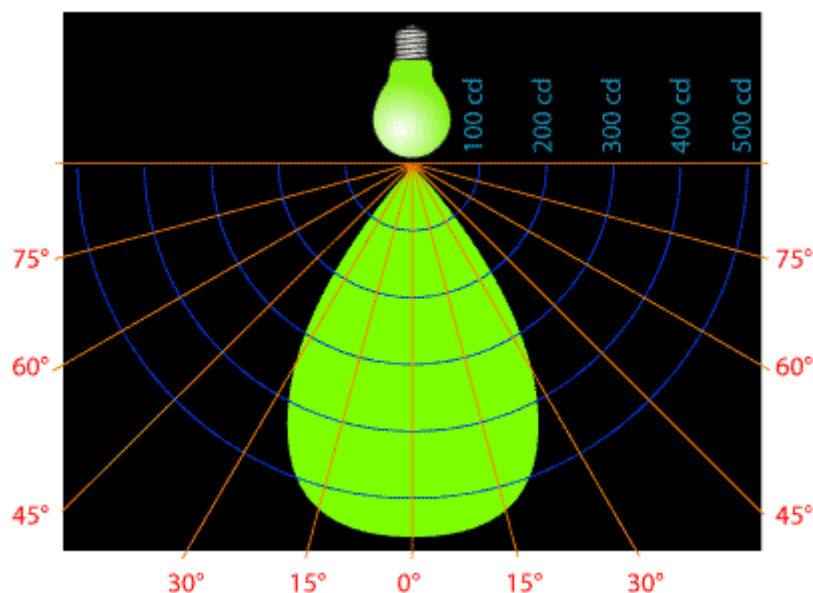
Svítivost udává prostorovou hustotu světelného toku zdroje v různých směrech. Svítivost lze určit pouze pro bodový zdroj, tj. pro zdroj, jehož rozměry jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností zdroje od kontrolního bodu.

Značení:

Symbol veličny:  $I$

Základní jednotka: kandela, značka jednotky: cd

Výpočet: Svítivost  $I$  ve směru určeném úhlem  $\gamma$  je rovna  $I = d\Phi / d\Omega$ , kde  $d\Omega$  je prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhlem  $\gamma$  a  $d\Phi$  je tok světelného zdroje vyzařující do prostorového úhlu  $d\Omega$ .



Obr. 3.4.1 Distribuční diagram svítivosti

### 3.5 Amplituda

Periodicky měnící se veličiny. Spolu s frekvencí a počáteční fází je amplituda jedním ze základních parametrů periodických dějů.

Značení:

K označení amplitudy se většinou používá značka měnící se veličiny s indexem  $m$  (maximální), příp. velké stejné písmeno, jako je značka veličiny. Pro okamžitou výchylku mechanického kmitání představuje amplituda maximální výchylku, ozn.  $y_m$  nebo  $Y$ , pro okamžitou rychlost mechanického kmitání představuje amplituda maximální rychlost, ozn.

vm, u střídavého proudu, resp. střídavého napětí je amplituda největší hodnota, které střídavý proud, resp. napětí dosáhne, ozn. Im, resp. Um

### 3.6 Polarizace

Jde o vlastnost, pomocí níž se popisuje určitá „chaotičnost“ světla. Elektromagnetické záření je příčným vlněním, které lze popsat kmity vektorů E a B kolmých na sebe a na směr šíření vlny. U nepolarizované vlny opisují koncové body obou vektorů chaotické křivky. U polarizovaného světla je naproti tomu průmět obou vektorů do roviny kolmé na směr šíření vlny přesně definován. Podle tohoto průmětu pak rozlišujeme polarizaci rovinnou, kruhovou, a eliptickou. Polarizaci posuzujeme dohodou podle směru elektrického vektoru. Při kruhové polarizaci opisuje konec elektrického vektoru v prostoru kružnici. Příkladem polarizovaného záření je například záření odražené od rovinného zrcadla.

### 3.7 Zdroje světla

sálání tepla, záření žárovky, sluneční světlo, záření plazmatu (oheň, oblouková lampa), atomová spektrální emise (emise mohou být stimulované nebo spontánní), laser a maser (stimulovaná emise), světlo LED diody, plynové výbojky, urychlení volného nosiče proudu, luminiscence, podle spouštěcího mechanismu:

chemiluminiscence

bioluminiscence

sonoluminiscence

triboluminiscence

fluorescence

fosforecence

katodové záření

radioaktivní rozpad

## 4. Laser

Laser (z angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je optický kvantový generátor, který je plně schopen využít jevu zesílení světla díky principu nucené emise záření. Laser je tedy jediným zdrojem uspořádaného – koherentního a vysoce směřovaného světelného paprsku.

#### 4.1 Rozdělení laserů

Podle prostředí, v němž se aplikuje generace záření, se lasery dělí na pevnolátkové, plynové, polovodičové, kapalinové a zvláštní skupinu tvoří i lasery s volnými elektrony.

Podle režimu činnosti se lasery rozdělují na dva základní typy. A to kontinuální a impulsní. Už podle názvu se zde jasně vymezuje funkčnost a použití laseru, kontinuální vyzařují paprsek v nepřetržitém obsluhou vymezeném časovém horizontu, zpravidla mají menší výkon a jsou užívány zpravidla ke komerčnějším účelům, naopak pulsní jsou nastaveny velmi vysokým výkonem k často velmi krátkému působení (operace, obrábění,...)

#### 4.2 Oblasti použití laserů

Lasery našly za čtyřicet let od svého objevu uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti: v průmyslu a vědě, lékařství, kosmetice, umění, zábavě, měření, laboratořích, výzkumu, apod. Ve strojírenství se lasery velmi často využívají k řezání nebo k povrchovým úpravám kovových součástek (povrchové kalení, žíhání, legování atd.). Pomocí laseru je možné detekovat jednotlivé atomy, rozdělovat izotopy. Laserové záření stimuluje chemické reakce, vytváří nové chemické látky. V lékařství se uplatnily jako varianta neinvazivních progresivních lékařských postupů, využívají se pro složitější operace očí a množství dalších chirurgických výkonů. Vznikly nové obory, jako je laserová medicína nebo holografie. Elektrotechnika pojednává o využití laserů v odvětví výroby termočlánků.

#### 4.3 Historie a objev laseru

První laser byl postaven již v roce 1960, avšak až v roce 1964 se o Nobelovu cenu za jeho objev podělili americký fyzik Charles Hard Townes se dvěma ruskými fyziky - Nikolajem Gennadijevičem Bassovem a Alexandrem Nikolajevičem Prochorovem. Podle ruských pramenů by měla být priorita za objev laseru přičena spíše fyziku Valentinu Alexandroviči Fabrikantovi, který od roku 1930 pracoval ve Vsesvazovém elektrotechnickém institutu (VEI). Tento vynikající vědec se v podstatě od počátku 30. let minulého století věnoval výzkumu elektrického výboje v plynech, jehož hlavním cílem bylo zdokonalování světelných výbojových zdrojů, a již ve své doktorské práci, kterou obhájil v roce 1940, ukázal na možnost existence prostředí s inverzní populací, které může zesilovat procházející záření v důsledku tzv. stimulované emise.

Čím bylo způsobeno toto zpoždění? Základní myšlenky, z nichž lasery a masery vycházejí, totiž neobsahovaly žádné vědecké zákony, které by byly neznámé alespoň některým vědcům již o 30, nebo i více, let dříve. Jako první poznal a stimulovanou emisi totiž popsal již v roce 1917 Albert Einstein. (V roce 1917 A. Einstein teoreticky zdůvodnil existenci elementárního procesu, při kterém přítomné záření rezonanční frekvence  $f$  vyvolává kvantový přechod, při němž je uvolněno kvantum /foton/ se stejnou frekvencí  $f$ . Směr šíření a polarizace vlny jsou stejné jako směr šíření a polarizace vlny, která kvantový přechod vyvolala. Tento proces bývá označován jako stimulovaná emise.)

Koncem 30. let minulého století byly publikovány ještě alespoň další dva texty týkající se možného zesílení pomocí stimulované emise záření. Vědecká a technická veřejnost tomu však v té době nevěnovala téměř žádnou pozornost - základy objevení laseru se totiž odehrávaly v té nejabstraktnější části fyziky – kvantové mechanice.

Ta pravá myšlenka objevu laseru dokonce nazrála v evidentně velmi nepravděpodobné oblasti výzkumu, ze které mohl být superintenzivní světelný zdroj generován – v mikrovlnné spektroskopii molekul. A přestože zákony kvantové mechaniky jsou pro většinu lidské populace doposud nesrozumitelné a nepochopitelné, vzniklo podle jejích zákonů něco tak mimořádně užitečného a praktického – laser. Jeho objev lze navíc významově srovnávat s největšími objevy v historii lidstva. Jak tomu však už u takových objevů bývá, dokonce i největší autority z oboru fyziky se ve své době k myšlence laseru stavěly s nečekanou nedůvěrou, nebo dokonce odmítavě. A tak tedy byl laser dříve postaven a funkční, nežli byl „objeven“.

Od udělení Nobelovy ceny v roce 1964 bylo uděleno dvanáct dalších Nobelových cen výzkumníkům, kteří použili masery nebo lasery jako důležité nástroje pro nové vědecké objevy.

#### **4.3 Stručně fyzikální princip laseru**

Laser je kvantový zdroj monochromatického intenzivního svazku světelných paprsků jehož rozsah se pohybuje v oblasti viditelného a blízkého neviditelného spektra elektromagnetického záření.

Spontánní emise tohoto světla vzniká následkem přechodu atomu z vybuzeného stavu do stavu základního. Stimulovaná (indukovaná) emise je v laseru způsobena interakcí atomů s elektromagnetickým zářením (fotonem). Pokud tedy látka obsahuje v jisté koncentraci vybuzené atomy schopné emise na určité vlnové délce, potom po vstupu záření stejné

vlnové délky dojde indukci k přechodu elektronů na nižší hladinu, což je provázeno emisí fotonů stejné energie.

Způsob, kterým se elektrony atomu vybudí na excitovanou hladinu se nazývá čerpání. Vybuzené atomy představují aktivní částice. Aby došlo k zesílení emise stimulovaného záření, musí být v aktivním prostředí vyroben přebytek aktivních částic. Protože u všech laserů jsou aktivní částice rovnoměrně rozptýleny v aktivním prostředí, musí být dráha, kterou proběhnou fotony způsobující stimulovanou emisi v aktivním prostředí co nejdelší.

Elektromagnetické pole, složené z vln s optickými frekvencemi, má vliv zejména na stav a strukturu elektronového obalu atomů. Dochází ke změnám doprovázeným přenosem energie mezi podsystemy, tj. atomy, molekulami nebo ionty a elektromagnetickým polem.

Světelné vlny jsou totiž zesilovány v procesu stimulace atomů nebo molekul, které mají přebytečnou energii, již mohou vyslat v podobě fotonů stejné frekvence a fáze, jako má světelná vlna.

Elektromagnetické vlny delší než 1 mm se nazývají mikrovlny, zatímco vlny kratší než 1 mm se označují jako infračervené a jsou považovány za „světlo“, přestože toto záření je viditelné pouze při vlnových délkách více než  $10^3$ krát kratších než vlnová délka 1 mm, která je považována za začátek infračervené oblasti.

Základní principy pro fungování stimulovaného zesilování jsou v podstatě tytéž v celém rozsahu elektromagnetického spektra, avšak lasery, poskytující infračervené záření, viditelné světlo a ultrafialové záření, jsou dosud nejlépe známy a nejvíce používány.

Mnohé masery a lasery byly nedávno objeveny ve vesmíru – ale tam existovaly a byly neobjeveny miliardy let. Dnes je známo více než 100 různých maserů a některé lasery s vlnovými délkami až asi jeden mikron, které se vyskytují v přirozeném stavu v mezihvězdném prostoru a v oblacích obklopujících hvězdy.

#### **4.4 Praktická konstrukční řešení laseru**

Je známo mnoho konstrukčních řešení laseru: jejich rozměr se mění od mikroskopického (např. nanotubicový laser), až po rozměr velké budovy.

Výkony těchto laserů se pohybují od hodnot menších než mikrowatt až do petawattů ( $10^{15}$  W). Výkon o petawattových hodnotách byl dosažen laserem v Lawrence Livermore Laboratory v USA. Je to výkon větší než veškerá spotřeba populace USA a z důvodů omezených zdrojů se tudíž omezuje na krátkou dobu - vyskytuje se v pulsech



trvajících řádově  $10^{-12}$  s. Tento výkon může být soustředěn na malou plochu, ne o moc větší, než je vlnová délka viditelného světla, přičemž hustota výkonu je asi  $10^{23} \text{W/cm}^2$ , což je nová oblast zkoumání vysokých hustot výkonu. Odhady ukazují, že jsou možné výkony dokonce  $10^6$ krát větší, což by znamenalo posunutí laseru do oblasti zetterwattů ( $10^{21}$ ).

Naopak na druhou stranu lasery mohou být tak jemné, že jimi lze uchopit jednotlivý mikroorganismus a jedinou buňku, aniž jim ublíží (laserové tweezery).

#### **4.5 Aplikace a užití laseru**

V dnešní době se stále více používá laseru jako výrobního nástroje. Předností laserového zpracování materiálu je jeho vysoká flexibilita, malé tepelné ovlivnění materiálu, různorodost materiálu, který se dá laserem zpracovávat a možnost inovace četných technologických systémů.

Lasery (a masery) se v mnoha aplikacích uplatňují v nejrůznějších výzkumných a průmyslových odvětvích. Poskytují vynikající etalony času a délky. Důležitou součástí systému globálního indikátoru polohy (GPI) jsou vodíkové maserové hodiny. Vodíkový maser umožňuje vyrobit hodiny s přesností asi 10–15 s, ve srovnání s hodinami na principu svazku cesiových atomů.

Lasery dokázaly změřit Rydbergovu konstantu (charakterizuje optická spektra atomů. Má hodnotu  $1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ .) s přesností  $5 \cdot 10^{-15}$ . Díky laserům není už mezinárodním standardem délky standardní metrová tyč, ale vlnová délka určité spektrální linie. Lasery jsou rovněž skvělým zaměřovacím nástrojem, který snadno poskytuje přímky i přesné měření vzdálenosti. Například laserové pulsy vyslané na Měsíc a odražené zpět na Zemi změřily vzdálenost Měsíce s přesností přibližně jeden palec (palec, angl. inch = 25,396 mm, střední vzdál. Země-Měsíc = 384 000 km). LIGO, experimentální aparatura v California Institute of Technology (USA) k měření gravitačních vln, používá laser k měření konstantnosti asi čtyřkilometrové vzdálenosti s přesností  $10^{-21}$  km nebo  $4 \cdot 10^{-16}$  cm, což je asi  $10^{-8}$  velikosti atomu. Velmi krátké časy, až několik násobků  $10^{-15}$  s, se také měří pomocí laserových pulsů a umožňují tak vědcům pozorovat procesy chemických reakcí. Masery a lasery poskytují nejcitlivější zesilovače elektromagnetických vln s citlivostí blízkou jednomu fotonu na jednotku šířky pásu.

Vysoký výkon laseru dovoluje vytvořit širokou škálu nelineárních optických jevů, přičemž poskytuje první, druhé a třetí harmonické frekvence světla, stejně jako směsi frekvencí. Lasery mohou s pomocí pulsů dát velké množství nelineárních efektů bez

přehřívání optického média, a tím poskytují nové fyzikální jevy a nové metody pro analýzu materiálů.

Lasery také mohou materiály ochlazovat; umožňují dosahovat teplot až  $10^{-6}$  K a otevírají tak další nové a široké pole fyzikálních jevů.

Vysoká frekvence viditelného světla představuje obrovský potenciál šířky pásu pro komunikaci a přenos laserového záření pomocí optických vláken, se šířkami pásu  $10^{-11}$  Hz přenášenými jedním optickým vláknem, je dnes důležitou součástí komunikační techniky.

Lasery jsou proto běžným a důležitým nástrojem při záznamu a čtení informace. Koncentrovaná energie krátkých laserových pulsů může řezat nebo odpařovat materiál. To činí lasery užitečnými pro operace v medicíně, ale i pro jiné způsoby využití v lékařství. Vysoce koncentrovaný výkon laserového svazku se široce využívá při řezání a svařování a v široké škále průmyslových výrobních postupů.

#### **4.6 Průmyslové využití laserového ohřevu**

V průmyslu se pro tento účel nejčastěji používají lasery CO<sub>2</sub> a Nd:YAG, v poslední době i diodové lasery a lasery rubínové.

### **5. Polovodičové lasery**

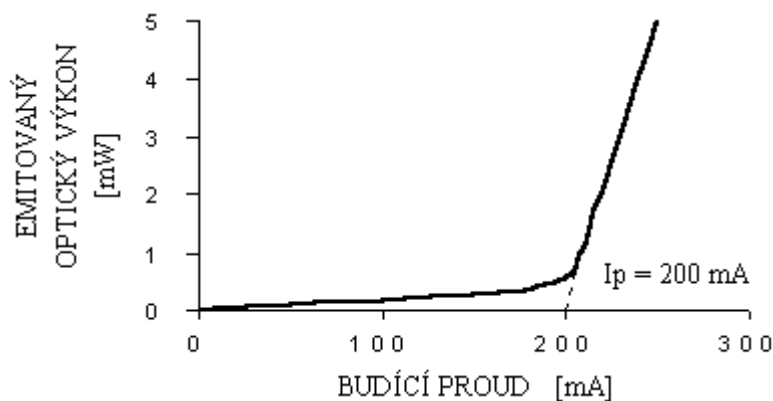
Ústředním tématem této práce je poskytnout základní informace o principu funkčnosti polovodičových laserů. Základem těchto zařízení jsou polovodičové diody, které jsou nosným úspěchem funkce zařízení.

#### **5.1 Princip funkce laserových diod**

Základem funkce všech laserů je proces stimulované emise. U polovodičových laserů - laserových diod je však tento proces specifický v tom, že v polovodičových krystalech jsou aktivní atomy hustě vedle sebe a zářivé přechody se neuskutečňují mezi diskrétními energetickými hladinami, ale mezi energetickými pásy. Elektrony obsazují nejnižší energetické hladiny ve vodivostním pásu až po Fermiho kvazihladinu pro elektrony  $E_{fn}$ . Stavby ve valenčním pásu jsou bez elektronů až po Fermiho kvazihladinu pro díry  $E_{fp}$  (plyne z principu zachování neutrality náboje). Při dopadu fotonů na polovodič s energií větší než  $E_g$  (šířka zakázaného pásu [eV]), ale menší než  $E_{fn}-E_{fp}$ , nemůže dojít k jejich absorpci, protože hladiny, na něž by se mohl uskutečnit přechod spojený s pohlcením fotonu, jsou již obsazeny. Dopadající fotony tedy mohou stimulovat přechody elektronů z vodivostního do valenčního pásu s následnou emisí nerozlišitelných fotonů od

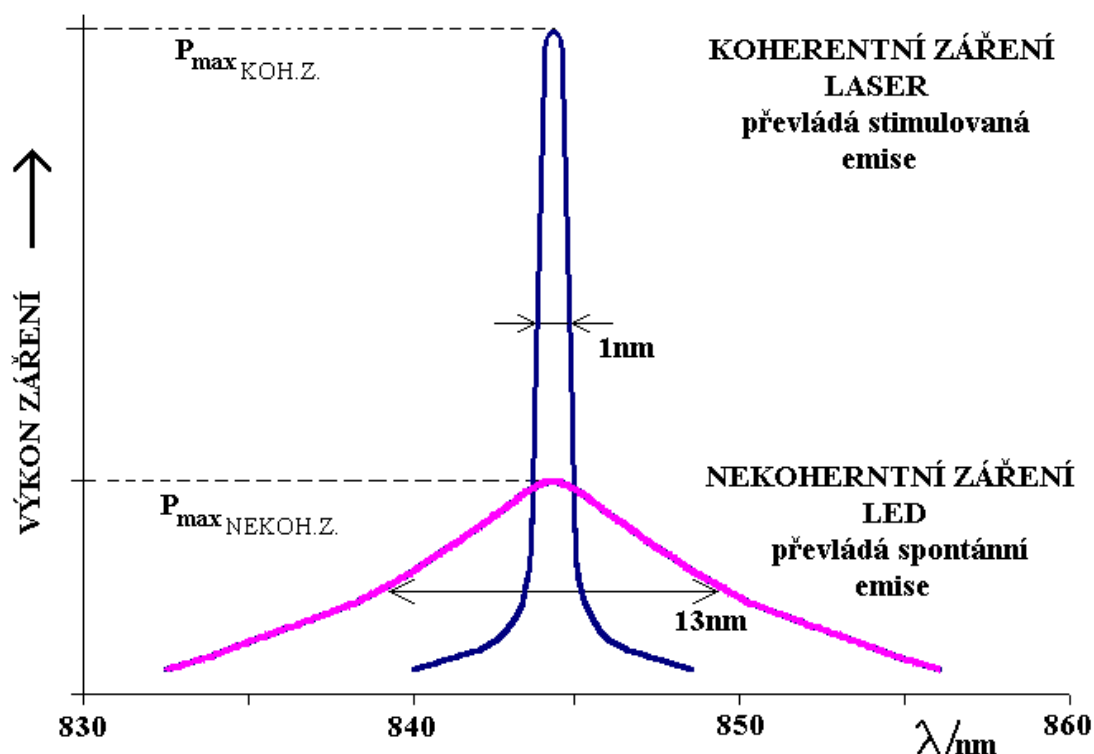
budících. Aktivní prostředí v "injekčních" polovodičových laserech (laserové diody čerpané elektrickým proudem) vzniká při injekci elektronů a děr z přechodu PN nebo z heteropřechodu. Ke generování optického záření pak dochází, jak je tomu i ve všech generátorech, v důsledku zavedení kladné zpětné vazby, která část zesíleného signálu z výstupu přivádí na vstup. K tomuto účelu se používají různé typy rezonátorů, selektivních odražečů nebo rozložené zpětné vazby. V současnosti je nejužívanějším rezonátorem v polovodičových laserech Fabry-Perotův rezonátor (stále více se však uplatňují tzv. DBF lasery, u kterých se rovnoběžných zrcadel využívá difrakčních mřížek. Vzhledem k tomu, že poměrný index lomu rozhraní polovodičový krystal - vzduch má poměrně vysokou hodnotu (pro GaAs je  $n_r=3,34$ ) nemusíme u injekčních polovodičových laserů používat speciální zrcadla, stačí využít odrazu elektromagnetické vlny od rozhraní. Podmínkou realizace takového rezonátoru je pak vzájemná rovnoběžnost dvou protilehlých stěn polovodičového laseru a jejich kolmost k rovině přechodu PN. V kubických krystalech se zrcadla rezonátoru získávají štípáním orientovaných polovodičových destiček s přechodem PN podél krystalografických rovin.

Při nízkých proudech tekoucích přes přechod PN v přímém směru dochází ke generování spontánního záření šířícího se ve všech směrech s náhodnou fází. Růst proudu zvyšuje rychlost zářivé rekombinace, což vede k růstu hustoty fotonového toku. Generované fotony stimulují další rekombinace. Vzhledem k tomu, že největší počet generovaných fotonů má energii rovnou energii maxima spektrálního rozdělení spontánní emise, nastává pro tuto energii nejvíc vynucených přechodů ve srovnání s jinými oblastmi spektrálního rozdělení. Tato okolnost pak vede k postupnému zužování spektra spontánní emise a výraznému růstu intenzity vyzařování v oblasti maxima spektrálního rozdělení emise. Roste-li intenzita vyzařování nelineárně s růstem buzení, nazýváme tento proces superluminiscence. Fotony generované v procesu superluminiscence se šíří stejně jako ve spontánním režimu ve všech směrech s náhodnou fází. Přechod k laserovému režimu nastává, když se stimulované zesílení rovná ztrátám a záření se stává koherentním. Koherence dosahujeme použitím optického rezonátoru, který zajistí selektivní zesílení elektromagnetické vlny s určitou frekvencí a definovanou fází, čímž vzniká stojaté vlnění. Stupeň koherence je dán kvalitou rezonátoru. Úzká oblast energie čerpání, při níž dochází k náhlému přechodu z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise, se nazývá práh. U injekčních polovodičových laserů máme co činit s prahovou hustotou budícího proudu resp. Prahovým proudem  $I_p$  a laserová dioda při něm přechází z režimu nekoherentního zdroje do režimu laseru.



Obr. 5.1.1 - Závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu

Pro malé proudy má záření spontánní charakter a je lineární funkcí budícího proudu. Po dosažení prahového proudu, tj. po dosažení prahu laserového generování, prudce narůstá výkon stimulovaného záření a ze zrcadel rezonátoru je emitováno koherentní záření opět lineárně závislé na velikosti budícího proudu. Zároveň také dochází ke kvalitativní změně tvaru vyzařovací charakteristiky laserové diody vyjádřené zmenšováním úhlu vyzařování v rovině kolmé a rovnoběžné s rovinou přechodu PN, rovněž ke zmenšení šířky pásma emitovaného záření viz obr.5.



Obr. 5.1.2 - Porovnání šířky pásma emitovaného záření při spontánní s stimulované emisi

## 5.2 Přehled jednotlivých typů laserových diod

Dle vnitřní struktury polovodičové lasery dělíme na:

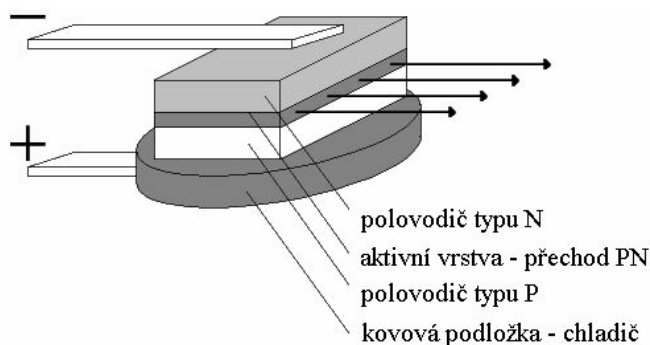
- HOMOSTRUKTURNÍ LASERY, Homostructure Laser "HoL"
- HETEROSTRUKTURNÍ LASERY, Heterostructure Laser "HL"
- LASERY S ROZLOŽENOU ZPĚTNOU VAZBOU, Distributed Feed Back Laser "DBFL"
- LASERY S KVANTOVÝMI JÁMAMI, Quantum Wells Laser "QWL"

Dle konstrukce - místa vyzařování polovodičové lasery dělíme na:

- HRANOVĚ VYZAŘUJÍCÍ LASERY, Edge Emitting Laser "EEL"
- PLOSNĚ VYZAŘUJÍCÍ LASERY, Vertical Cavity Surface Emitting Laser "VCSEL"

## 5.3 Homostrukturní lasery

Na tomto typu laseru bylo poprvé dosaženo v r.1962 emise koherentního záření. Je v podstatě tvořen přechodem PN. Neexistuje zde výrazná skoková změna indexu lomu, která by podmiňovala optické soustředění, ani vysoká potenciálová bariéra zajišťující soustředění nosičů náboje. Šířka rekombinační oblasti (aktivní vrstvy) je v podstatě určena difúzní délkou menšinových nosičů (pro silně dopovaný GaAs 1-3mikrometru). Záření se soustřeďuje vlivem gradientu indexu lomu a vlivem rozdílu koncentrace nosičů náboje.



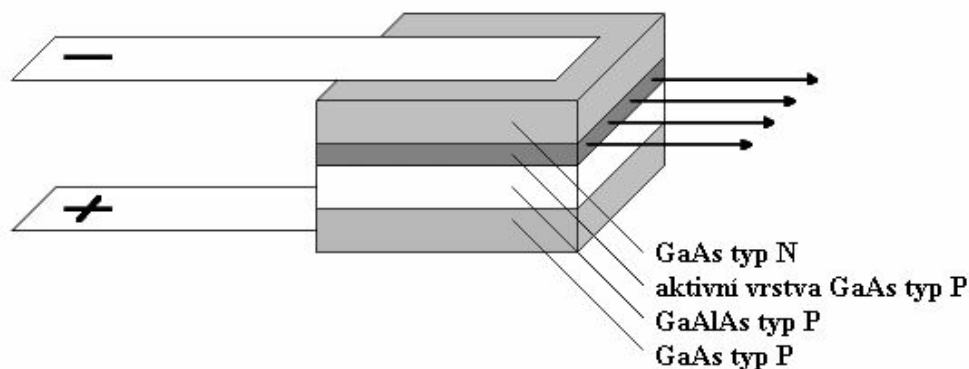
Obr.5.3.1 Homostrukturní laser

Vlivem velké šířky aktivní oblasti jsou potřebné velké prahové hustoty proudu. Při generaci záření dochází ke ztrátám vlivem úniku záření do okolních vrstev polovodiče a z toho pramení malá účinnost. Při provozu je nutné dostatečné chlazení. Proto tento typ polovodičových laserů nemá velké praktické využití.

#### 5.4 Heterostrukturální lasery

V těchto typech laserů s heteropřechody je vymezení vlnovodu dáno skokovou změnou indexu lomu v oblasti heteropřechodu, která je funkcí rozdílu šířky zakázaného pásu sousedních vrstev heterostruktury (krystalická vrstevnatá struktura obsahující alespoň jednu epitaxní vrstvu odlišného chemického složení než je složení podložky, u PL je důležité přizpůsobení mřížkových parametrů). Současně s účinným vedením světla zabezpečuje heterostruktura i podmínky k účinnému soustředění menšinových nosičů. Působením heteropřechodu se soustřeďuje záření a injektované nosiče do zvolených oblastí, přičemž oblast soustředění záření (optický vlnovod) může být totožná s oblastí soustředění nosičů (aktivní oblastí) nebo se od ní může lišit.

Podle počtu heteropřechodů se dělí HL na lasery s jednou heterostrukturou (SingleHL, obr.5.4.1) a s dvojitou heterostrukturou (DoubleHL, obr.5.4.2).

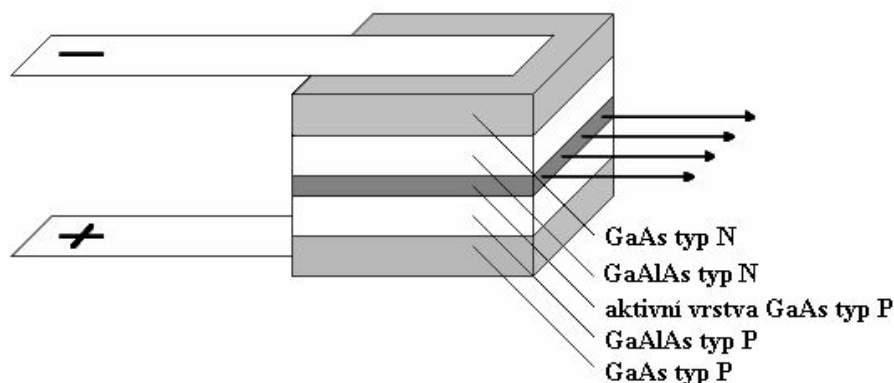


5.4.1 Single HL laser

V jednoduché heterostruktuře SHL vytváří heteropřechod jednu ze stěn vlnovodu a současně i potenciálovou bariéru soustřeďující nosiče uvnitř aktivní vrstvy typu P. Skoková změna indexu lomu je zde mnohem větší než u homopřechodu. Přechodem PN a heteropřechodem je tím vymezen asymetrický vlnovod. Hodnoty proudových hustot klesají asi na pětinu hodnoty dosahované u homostrukturálních laserů.

Lasery s dvojitou heterostrukturou DHL mají aktivní vrstvu obklopenou z obou stran vrstvami s větší šířkou zakázaného pásu, nosiče náboje i optické záření jsou

soustředovány do aktivní oblasti z obou stran, tedy i s větší účinností. Oblast rekombinace je u DHL přesně definována. Nedochází zde k "roztékání" nosičů náboje do okolních vrstev. Nahromadění nosičů náboje v aktivní vrstvě je vzhledem k jejímu malému průřezu (až 100nm) je tak velké, že režimu laserování se dosahuje už při prahových proudtech několika desítek mA. Účinnost je velmi vysoká, kolem 75%.



Obr.5.4.2 Double HL laser

Obě uvedené kategorie HL mají velký počet konstrukčních modifikací zlepšující některé z vlastností laserů:

### 5.5 Lasery s postraním omezením

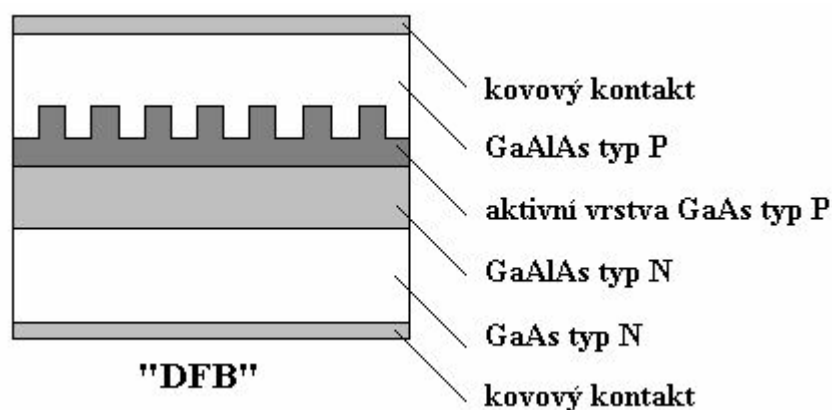
V HL jsou nosiče náboje i záření soustředěny v směru kolmém k rovině přechodu PN. Tento typ vymezuje aktivní oblast i v rovině přechodu PN. K ohraničení se používá tzv. proužková geometrie (stripe geometry). Ta vede ke zmenšení plochy aktivní vrstvy a tím i hodnot prahových proudů. Při šířce proužku pod 15 mikrometrů může laser pracovat v základním příčném modu TEM<sub>00</sub>. Tato technologie umožňuje účinnější navázání záření do optického vlákna. Prahové proudy se pohybují v rozmezí 10-250 mA. Výstupní optický výkon je v intervalu 5-25 mW.

Provedení: Laser s proužkem kontaktním, s difúzním, vymezeným přechody P<sup>+</sup>N, laser připravený na profilované podložce, se zarostlou heterostrukturou.

### 5.6 Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou

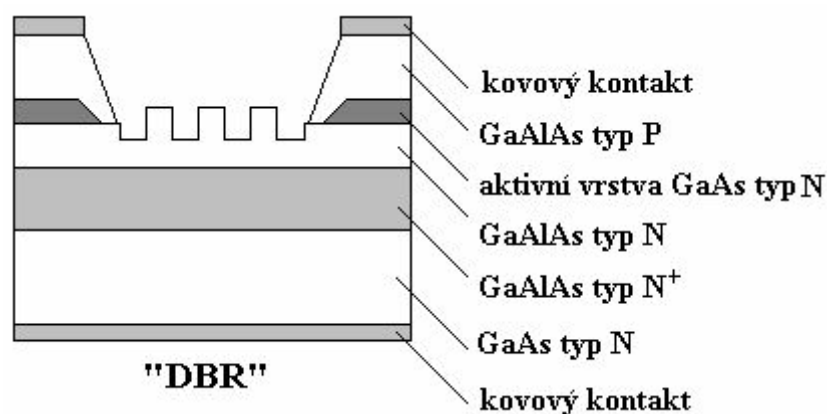
U tohoto typu laseru je rezonátor realizován bez zrcadel pomocí prostorových periodických struktur (difrakčních mřížek). Funkce je založena na periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Zpětná vazba vzniká trvalým navázáním šířící se vlny do

opačného směru Braggovským rozptylem. Mřížka se vytváří leptáním přímo na povrchu aktivní vrstvy. Tyto lasery jsou označovány jako DFB (Distributed Feed Back), obr.5.61



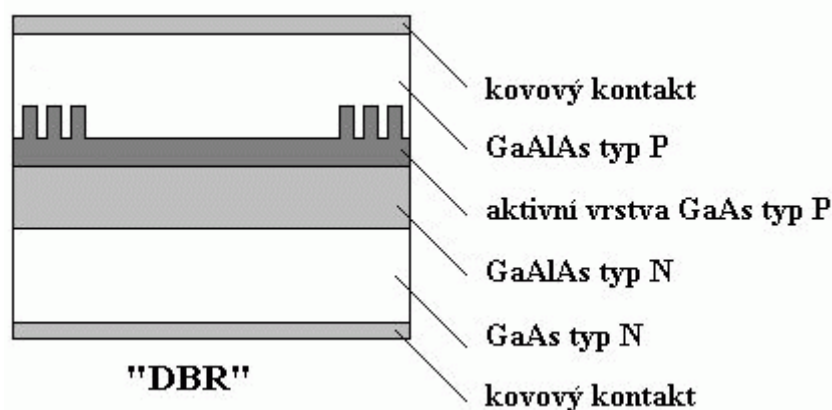
Obr.5.61 DFB Laser

Do této kategorie patří i Lasery s rozloženým Braggovým zrcadlem, označované jako DBR (Distributed Bragg Reflector). U tohoto typu se generace optického záření a zpětná vazba (opět pomocí optické mřížky) uskutečňují v samostatných částech struktury. Užívají se dva typy konstrukce, s jedním nebo se dvěma Braggovými zrcadly. V běžné praxi se častěji užívá typ se dvěma Braggovými zrcadly na koncích vlnovodu.



Obr.5.62 DFB laser s jedním Braggovým zrcadlem





Obr.5.63 DFB laser se dvěma Braggovými zrcadli

DFB lasery jsou vhodnými zdroji pro systémy integrované optiky pro pásmo 1,3-1,55 $\mu\text{m}$ , neboť nahrazením Fabry-Perotova rezonátoru optickou mřížkou umožňují jednomódový provoz (pozn. provoz v jednom podélném modu, perioda mřížky určuje vlnovou délku záření) při kvalitním napojení na optický vlnovod. Další výhodou je jejich slučitelnost s planárními vlnovody připravenými na jediné podložce, tedy jejich snadná výroba. DFB lasery dosahují velmi úzké spektrální šířky (pod 1nm) a poskytují modulační šířku pásma hluboko do oblasti GHz. Používají se v mnoha aplikacích včetně komunikací optickými vlákny pro vlnové délky 1300 a 1550 nm.

## 5.7 Lasery s kvantovými jámami

Tento typ označovaný jako Quantum Wells Laser - "QWL" má dvojistou heterostrukturu, jehož aktivní vrstva (označovaná jako kvantová jáma) lišící se složením je tak tenká, že se při generaci optického záření uplatňují kvantové jevy podmíněné její tloušťkou. Zde představuje DH pravoúhlou potenciálovou jámu ve vodivostním i valenčním pásmu polovodiče. Jestliže jsou rozměry vrstvy srovnatelné s de Broglieho vlnovou délkou (v tepelné rovnováze elektronu) může elektron nabývat jen určitých energií, které odpovídají vlnovým délkám, jež jsou násobkem těchto miniaturních rozměrů aktivní vrstvy.

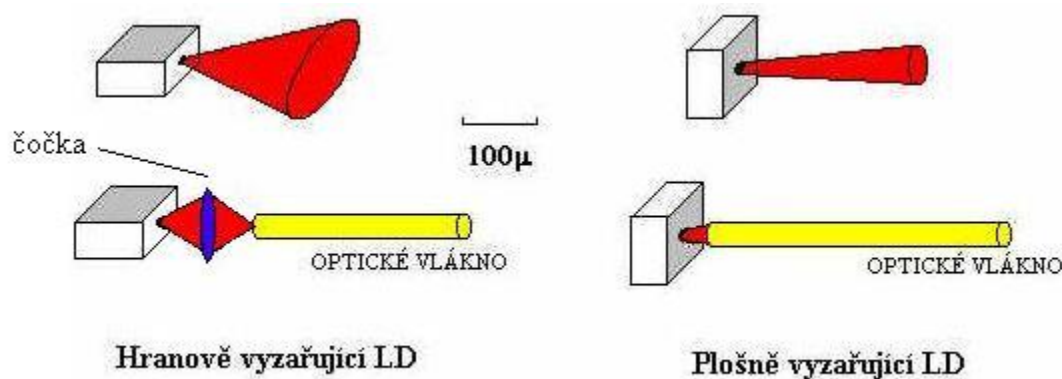
Epitaxní technologie umožňují realizovat lasery s tloušťkami kvantové jámy tenčími než 20nm. Současnými technologiemi lze realizovat vrstvy tvořené pouze jedinou atomovou rovinou. Takto je možno získat PL s velice úzkou spektrální charakteristikou. Teplotní závislost prahového proudu  $I_P$  je přitom mírnější než u předchozích typů PL.

Běžná tloušťka aktivní vrstvy je 10nm. Prahové proudy pro SQWL jsou přibližně v rozmezí od desetin mA po několik málo desítek mA. Účinnost těchto typů laserů může

překročit až 80%. Výstupní optický výkon běžně dosahuje desítek mW v kontinuálním režimu (MQWL). V souvislosti s různými typy LD nelze opomenout tzv. POLE LD, které mají veliký význam především v oblasti velkých optických výkonů. Běžně se nyní vyrábějí pole LD (arrays, bars) s celkovými výkony až stovek W, přičemž byly prezentovány pole LD o výkonu i několik málo kW.

### 5.8. Hranově vyzařující lasery

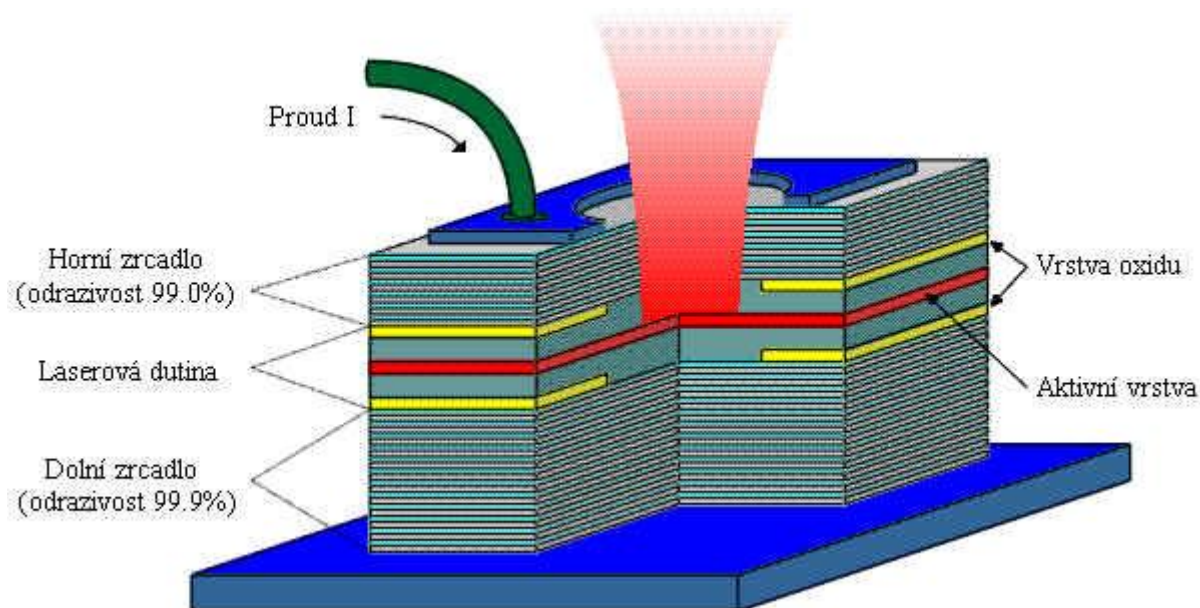
Tento typ konstrukce polovodičových laserů - laserových diod (Edge Emitting Lasers - EEL) vysílá záření z hrany přechodu. Ve výrobě i aplikacích laserových diod zatím převládá. Stále více se však uplatňují plošně vyzařující typy konstrukce LD (VCSEL).



Obr 5.8.1 Schéma vyzařování LD

### 5.9 Plošně vyzařující lasery

VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) emitují záření z plochy součástky rovnoběžné s rovinou přechodu. Záření emitované z plochy je pohlceno substrátem a ztraceno nebo, což je výhodnější, se odráží od kovového kontaktu (tj. možné při použití transparentního substrátu). Tento typ konstrukce bývá účinnější nežli hranově emitující LD (EEL). Při navazování světelného záření z VCSEL do optického vlákna bez dalších optických komponent se dosahuje účinnosti až 80%. VCSEL - kruhový úhel divergence  $9^\circ$ , EEL - úhel divergence  $30^\circ$ ,  $40^\circ$



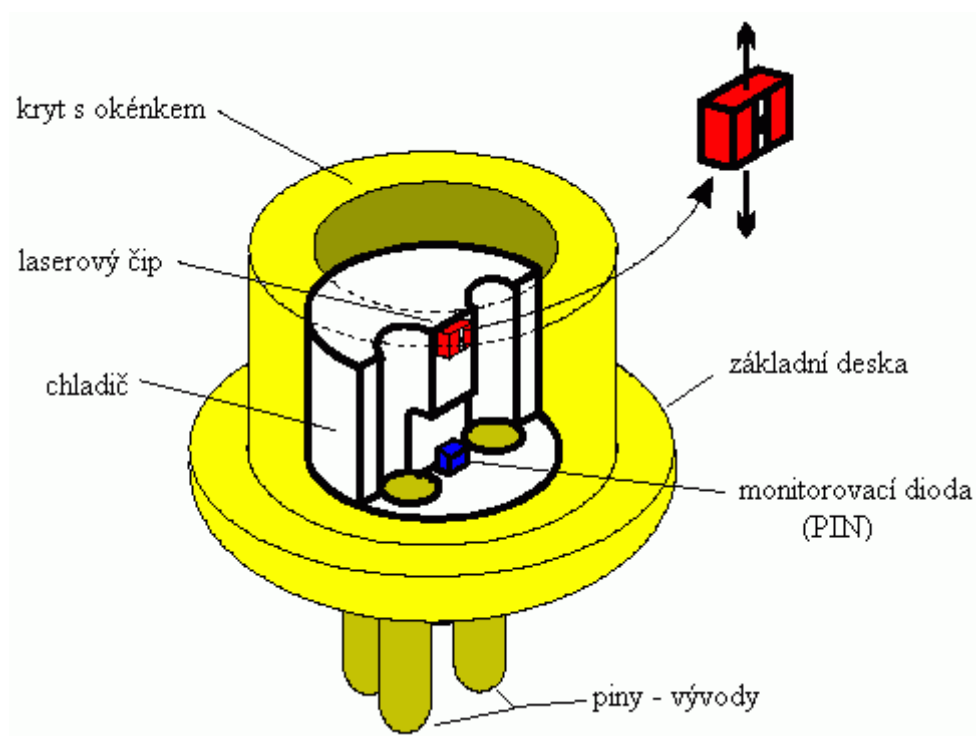
Obr.5.9.1 Schéma vyzařování plošných laserů

Technologie hranově vyzařujících laserových diod EEL je velmi dobře zvládnuta a v praxi se běžně používá. Plošně vyzařující laserové diody VCSEL jsou z hlediska svých výhodných vlastností velmi zajímavé pro vláknové komunikační systémy v oblasti vlnových délek 1300 a 1550 nm, kde se používají pro velké vzdálenosti jednomódová vlákna. V současné době se vývoj soustřeďuje právě na tento typ konstrukční technologie laserových diod.

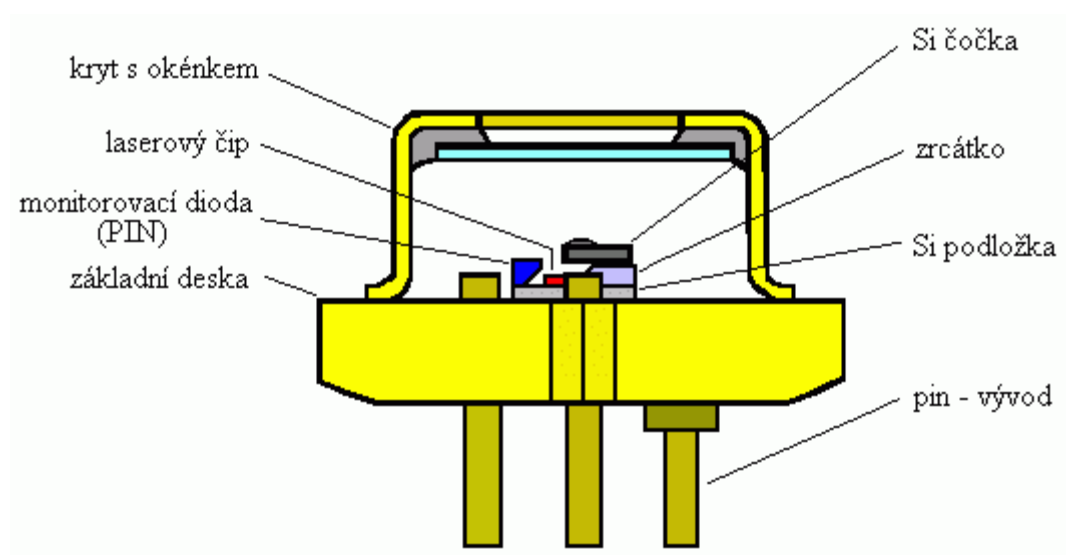
## 6. Pouzdření laserových diod

Při pouzdření laserových diod se využívá vlastnosti, že světlo může vycházet z laserového chipu dopředu i dozadu, je tedy možno zadní světlo použít k monitorování optického výkonu. Poměry mezi zářením dopadajícím na monitorovací diodu a zářením vystupující z LD se pohybují kolem 10% a 90%. Jako monitorovací dioda se většinou k tomu používá fotodiody (PIN), která je umístěna v pouzdře v blízkosti laserového chipu. Tato dioda má alespoň jeden vývod samostatný a lze ji zapojit libovolně, jak ve fotorezistivním (závěrném) režimu, tak i ve fotovoltaiickém režimu. Procházející proud je přímo úměrný záření laseru. Pouzdro laserové diody se většinou skládá z vlastního laserového chipu, monitorovací PIN diody, základní desky, na které jsou tyto části přilepeny, pinu (nožiček), spojů a krytu s okénkem, které bývá u dražších LD antireflektované nebo také skloněné. Mnohé z pouzder LD určených pro telekomunikace obsahují také odrazné zrcátko a čočku, která fokusuje vycházející záření. Toho se výhodně

využívá při navazování záření do optických vláken. Jedná se o tzv. konektorované (typ receptacle) nebo pigtailované laserové diody. Celá dioda je hermeticky zapouzdřena.



Obr 6.1 průřez zapouzdřením LD

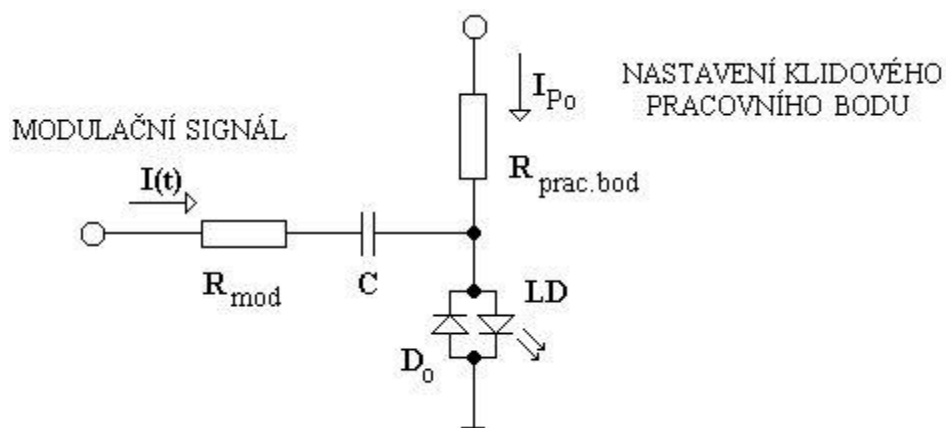


Obr 6.2 Schéma LD s odrazným zrcátkem a čočkou, která fokusuje vycházející záření

## 7. Napájení laserových diod

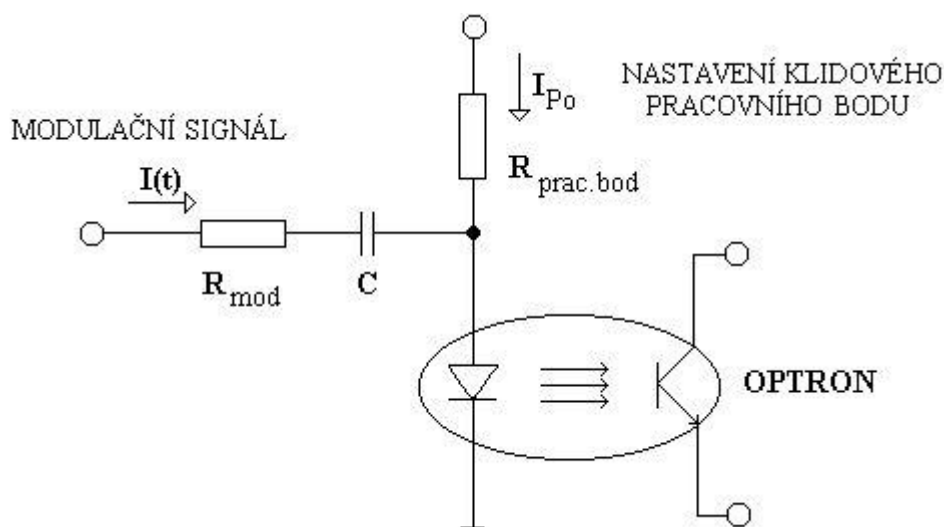
Laserové diody mají poměrně nízkou dynamickou impedanci v lineární části své voltampérové charakteristiky. Proto je žádoucí, aby byly napájeny zdrojem s dostatečně velkou výstupní impedancí, tzn. z proudového zdroje, který dodává konstantní proud i při změně zátěže. Používáme-li napájení z napětového zdroje, řadíme do série s LD prvek omezující proud, např. rezistor s  $R=10\Omega$ . Tímto prvkem se také může nastavit pracovní bod laserové diody. V reálné praxi se používají stabilizované zdroje proudu, které umožňují přesné nastavení požadovaného proudu (obvykle desítky mA).

Důležitá je ochrana LD před napětím v závěrném směru převyšující asi 1V, jak v kontinuálním tak v impulsním režimu. K LD se proto připojuje antiparalelně rychlá ochranná dioda, viz. obr.7.1. Při provozu je třeba dbát na důkladný odvod tepla. Při nedostatečném chlazení se LD rychle zahřívá, mění svůj odpor, tím se zvyšuje procházející proud a může dojít k jejímu zničení (zejména u kontinuálně pracujících LD). Se změnou teploty se také mění další parametry: roste prahový proud, mění se vlnová délka, více se uplatňuje spontánní emise atd. (podrobně již bylo rozebráno v 3.části seriálu LASEROVÉ DIODY 3 - Parametry laserových diod a jejich měření). Pro návrh pracovního bodu LD je třeba důkladně prostudovat katalogové hodnoty jednotlivých parametrů a ty v žádném případě nepřekračovat (zejm. napětí a proud LD v propustném směru)



Obr.7.1 Principiální schéma čerpání LD

Při experimentech s obvody pracujícími v součinnosti s LD je reálné nebezpečí poškození náhodným přebuzením či nežádoucími překmity. Abychom se tomuto vyhnuli, lze před zapojením LD použít simulátor laseru, což může být např. obyčejná usměrňovací dioda, luminiscenční dioda (zřejmá výhoda světelné signalizace) či optron (součástka tvořená luminiscenční diodou, přenosovým prostředím a fototranzistorem, obr.7.2). Pro zmenšení tepelného namáhání laseru se používá velká střída, což umožňuje snížit rozptýlený výkon.



Obr.7.2 Schéma zapojení ochranné diody

V praxi jsou různé požadavky na vlastnosti emitovaného záření, např. konstantní generovaný optický výkon, vysokorychlostní modulace bez zkreslení přenášeného signálu nebo frekvenční stabilita, která je zvláště důležitá u optických sdělovacích a WDM či DWDM systémů. K nastavení konstantního optického výkonu se používá již zmíněná monitorovací fotodioda (nejčastěji PIN dioda), která snímá okamžitý generovaný optický výkon. Pomocí "monitorování" procházejícího proudu touto fotodiodou a zavedením zpětné vazby lze snadno ovlivnit napájecí proud laserové diody, který již nastaví požadovaný konstantní optický výkon (funkce je obdobná jako stabilizátory proudu s operačními zesilovači). Pro zajištění této a dalších vlastností se používají nejrůznější elektronické obvody. Při práci s laserovými diodami je nutné dodržovat ESD (electrostatic discharge) předpisy, např. elektrostatické náramky, zemění atd., jinak hrozí velmi snadné zničení těchto choulostivých součástek.

### 7.1 Impulsní režim laserových diod

Jedním ze způsobů získání impulsního režimu čili impulsů záření je použití kontinuálního laseru (CWL) a externí uzávěrky nebo modulátoru, který propouští záření jen během krátkého časového intervalu. Tento způsob má ovšem zřejmé nevýhody, první je nízká účinnost, protože v době mezi jednotlivými impulsy se energie vyzařovaná laserem blokuje (ztrácí se), druhou je skutečnost, že špičkový výkon impulsů nemůže přesáhnout hodnotu stálého výkonu CWL. Další nevýhoda spočívá v tom, že jsou to poměrně složitá a drahá zařízení vyžadující další speciální řídicí elektroniku. Takovéto externí uzávěrky mohou být realizovány např. jako akustooptický či elektrooptický

modulátor nebo klasický mechanický modulátor (tzv. chopper).

Účinnější metodou získávání impulsů je zapínání a vypínání laseru vnitřní modulací, takže energie nashromážděná v době mezi impulsy je vyzářena během impulsu. Energie se může hromadit buďto v rezonátoru ve formě světla, které je periodicky vypouštěno ven, nebo v atomárním systému ve formě inverzního obsazení a energie se periodicky uvolňuje při oscilaci systému. Tyto způsoby umožňují generovat krátké laserové impulsy se špičkovým výkonem větším než je výkon CWL. Při aplikacích s laserovými diodami se nejčastěji užívá metoda spínání zisku, lze také realizovat metodu modové synchronizace (tzv. modelocking), která se však v běžné praxi až na výjimky nepoužívá.

## 7.2. Spínání zisku

Metoda je založena na kontrolovaném zapínání a vypínání čerpání. U LD čerpané injekčním proudem lze čerpání periodicky zapínat na krátkou dobu elektrickým impulsem. Během zapnutého čerpání přesáhne koeficient zesílení hodnotu koeficientu ztrát a je generováno laserové záření, princip viz. obr.7.2.1 Spínání zisku je výhodné, protože lze snadno modulovat čerpací elektrický proud. Dnes se běžně dosahuje modulačních frekvencí okolo 2,5 GHz



Obr.7.2.1 Generace laserového záření

## 7.3 Aplikace laserových diod

Laserové diody mají mnoho výhodných vlastností, z nichž pro technickou praxi jsou nejdůležitější zejména:

- vysoká účinnost přeměny elektrické energie na energii koherentního optického záření
- malá setrvačnost dovolující modulaci laseru až do frekvencí  $10^{10}$  Hz

- miniaturní rozměry podmíněné existencí vysokých hodnot zisku v objemu polovodiče, což umožňuje udržet generaci i při malých rozměrech aktivního prostředí
- jednoduchost součástky, možnost nízkonapěťového napájení, podmiňující slučitelnost s integrovanými obvody

Polovodičové lasery však mají i určité nedostatky, mezi něž patří:

- nižší prostorová a časová koherence generovaného optického záření
- nižší teplotní stabilita a odolnost proti vlivům ionizujícího záření

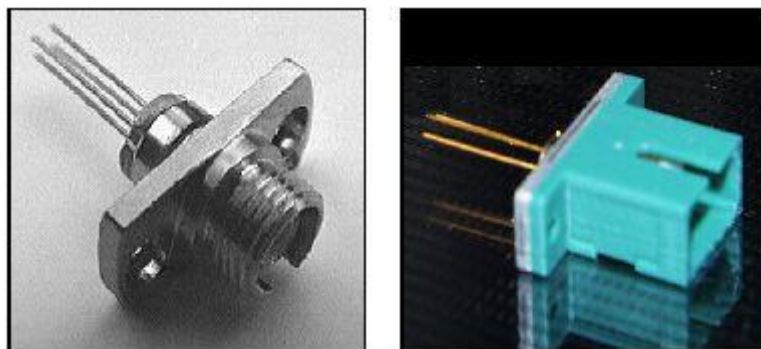
Současné technologie dovolují připravit lasery se zaručenými parametry a dobou života kolem  $10^5$  hod. Uvedené okolnosti způsobují, že LD mají široké aplikační možnosti v různých oblastech vědy a techniky.

Nejvýznamnější je použití LD v optických sdělovacích systémech (optických telekomunikací), kde se k přenosu využívají optická vlákna mající v určitých oblastech vlnových délek minimální útlum. Tyto tzv. komunikační okna přísluší zejména vlnovým délkám 800-900nm a 1,3-1,55mikrometrů. Laserové diody v podstatě převádí elektrický signál v podobě modulačního elektrického proudu na odpovídající optický signál, který bývá navázán do již zmíněných optických vláken a jimi přenášen na malé či velké vzdálenosti. LD jsou také používány v optických směrových spojích. Několik modulů s laserovými diodami je vidět na následujících fotografiích.

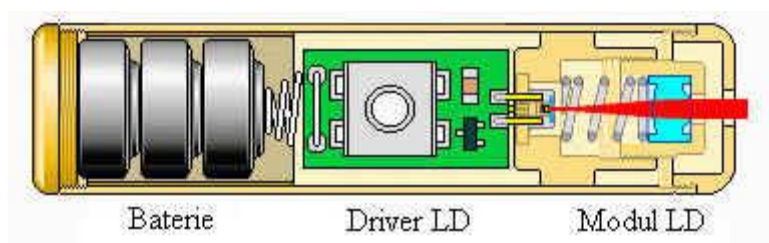


*Obr. 7.3.1 - Pigtailované laserové diody (LD s najustovaným a přivařeným optickým vláknem)*





Obr. 7.3.2 - Receptacle laserové diody (LD s konektorem pro optické vlákno, typ FC a SC)



Obr. 7.3.3 - Typické schéma laserového ukazovátka

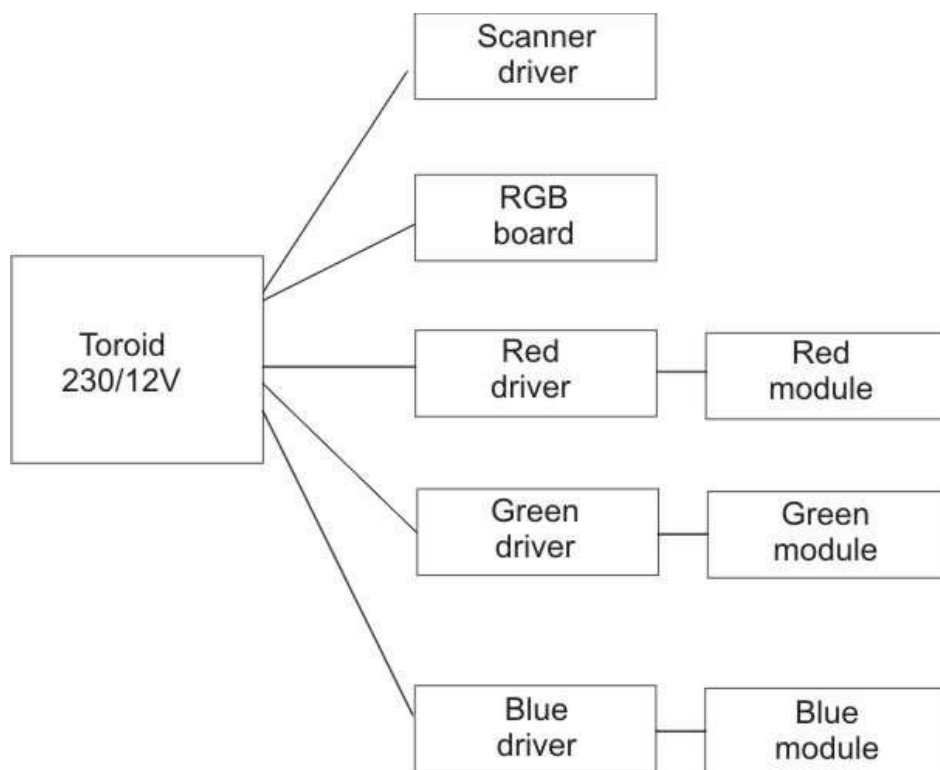
## 8. Konstrukce jednoduchého polovodičového laseru

V této kapitole diplomové práce je popsán princip funkčního polovodičového grafického laseru. Jedná se o popis principu sériově vyráběného grafického zařízení společnosti Kvant Ltd. Veškeré materiály, které jsou uvedeny v této kapitole autor obdržel s příslibem dodržení mlčenlivosti vůči ostatním výrobcům a vývojovým skupinám, vzhledem k výrobnímu tajemství. Zároveň se autor zavázal, že materiály budou použity výhradně ke studijním účelům.

Dle instrukcí odborných zástupců výrobce laserů, je popis zařízení rozdělen do dvou hlavních částí a to na optickou a elektronickou část, které jsou jednoduše prezentovány v následujících řádcích.

### 8.1 Konstruktivní řešení jednoduchého polovodičového laseru

V následující části diplomové práce je popsán základní zjednodušený princip funkce a konstrukce polovodičového, efektového, grafického laseru. Jeho konstrukce je rozdělena do dvou základních částí a následně je popsána. Pro pochopení zapojení jednotlivých součástí je přiloženo zjednodušené blokové schéma laseru.



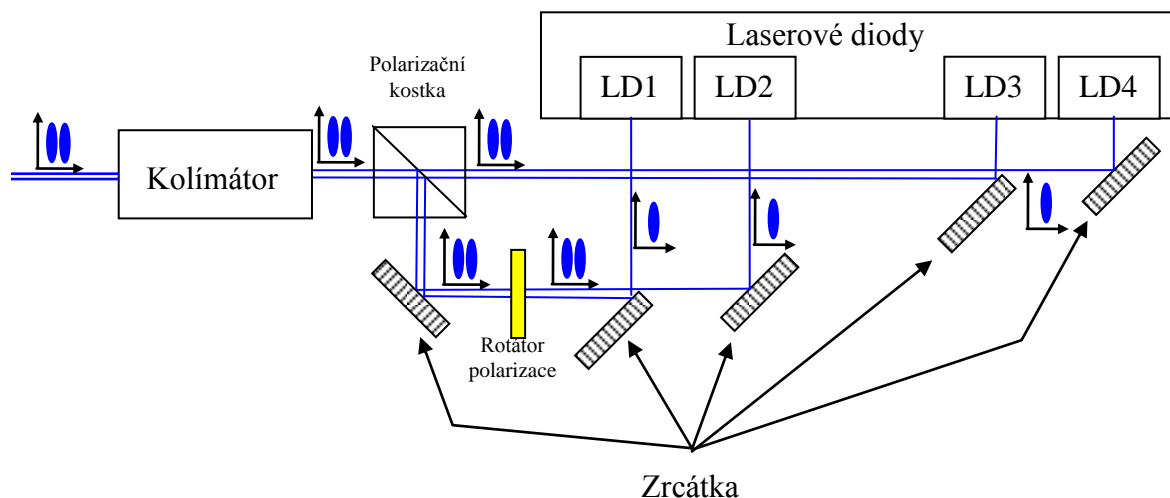
Obr. 8.1.1 Zjednodušené blokové schéma RGB laseru

### 8.1.1 Optická část

Složení optické části laseru je tvořeno z několika základních prvků. Základem je laserový modul (dle výkonu, popřípadě barevné škály jich může být několik), při použití více modulů dichroická zrcátka s regulací popřípadě polarizační kostka, X,Y motorky se zrcátky pro projekci paprsku.

### 8.1.2 Složení optické části polovodičového laseru

Optická část laseru je hlavním zobrazovacím nástrojem grafického laseru. Je složena z laserového modulu, který obsahuje polarizační kostky (popřípadě dichroodrazové sklička), rotátoru a kolimátoru. Paralelně s každým LD zdrojem je spojen tzv. lasorb, jenž slouží jako ochrana každé laserové diody. Tohoto opatření se používá z důvodu nestability při proudových rázech (například při náhlém vypnutí a zapnutí napájecí sítě)



Obr. 8.1.2.1 – Schéma laserového modulu Kvant Red 600mW

## 8.2 Složení laserového polovodičového modulu

Prvky obsahující standardní polovodičový laserový modul jsou popsány v následujících řádcích. Důležitým prvkem je Rotátor polarizace a polarizační kostka. Kompletní montáž laserového modulu musí být naprosto precizně provedena. Laserový modul samotný musí splňovat 2 podmínky. Prachotěsnost a vlhkotěsnost. Pokud by jediná z podmínek nefungovala, tak by se laserový modul časem zanesl a ztrácel by podstatnou část svého výkonu, popřípadě by hrozilo riziko zničení diod. Na výstupu z laser modulu je místo obyčejného sklíčka použito sklíčko antireflexní z důvodu snížení ztrát. U antireflexního sklíčka jsou ztráty výkonu okolo 0,5%. U obyčejného sklíčka by mohli ztráty dosahovat 5 i více %.

### 8.2.1 Laserová dioda

Je hlavním prvkem optické části polovodičového laseru, pomocí principu PN přechodu a stimulované emise záření vytváří svazek paprsků, který je projektován do okolí.

Důležitým faktem u polovodičových laserů je sbíhavá čočka na výstupu každé diody, ta srovnává svazek různorodých paprsků právě do uceleného svazku paprsků, který je promítán na odrazová dichrosklíčka. Zde se taky patrně rozvíjí rozdíl v pojmech paprsek a

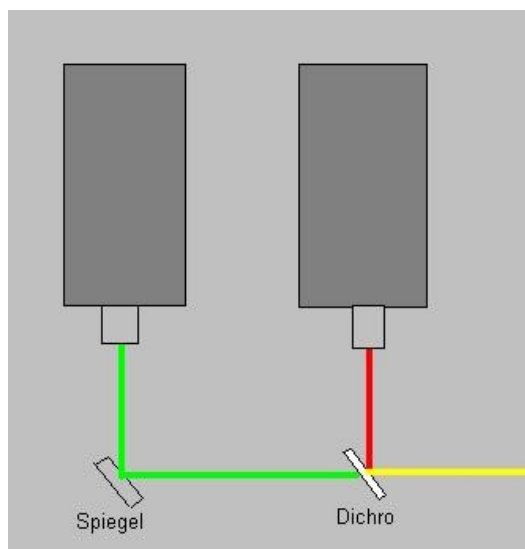
svazek paprsků. Paprsek je vlastně jen jedna čára uvnitř svazku paprsků, zatímco svazek paprsků je skutečný louč co vidíme.

### 8.2.2 Dichrozrcátko

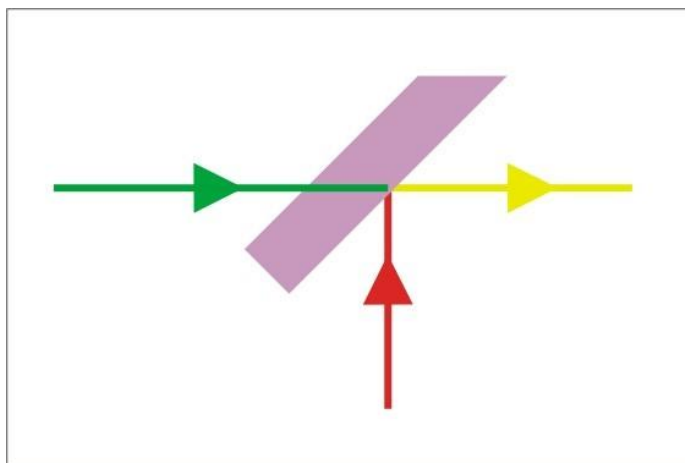
„Dichroic“ znamená, že materiál ukazuje dvě barvy. Jsou vytvořeny uložení tenkých vrstev oxidů kovů na skleněných substrátech. Vzhledem k tomu, že jsou schopni samostatné světlo v určitých ohledech rozkládat, jsou také známe jako **rozbočovače**.

#### 8.2.2.1 Shánění a slučování laserových paprsků:

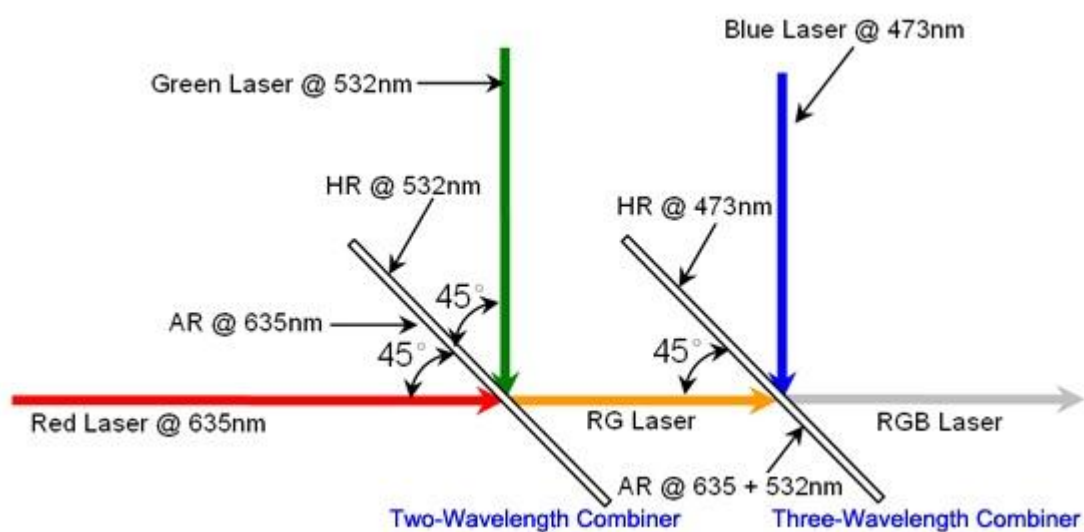
Mícháním laserových paprsků ve vhodném poměru můžeme dosáhnout všech odstínů barevné škály. Nejčastěji se používají v sériové výrobě pro míchání bare zdrojů R a G, které díky svému míchání umí vytvořit červenou, zelenou, žlutou barvu v různých odstínech. Pro namíchání plné barevné škály se používají R,G,B moduly. Pro toto míchání se velmi často používají dichrozrcátka. U dichroického zrcadla nejvíce záleží na propouštěných a odrážených vlnových délkách, které určují použití. Dichro není určené pro sloučení paprsků libovolných barev! Dle naladění dichrozrcátko určitou barvu propustí a jinou odrazí. Záleží na typu pokovení. Na následujících obrázcích je popsáno jak funguje míchání paprsků a jaká je funkce dichrosklíček.



Obr. 8.2.2.1.1 princip funkce dichrosklíček



Obr. 8.2.2.1.2 princip funkce dichrosklíček



Obr. 8.2.2.1.3 Princip míchání RGB

### 8.2.3 Polarizační kostka

Funguje v laserové optice jako slučovač dvou různých svazků paprsků. Nejčastěji bývá kostka vyrobena ze dvou trojúhelníkových skleněných hranolů, které jsou slepeny dohromady pomocí speciálního lepidla (často kanadský balzám). Kostka je navržena tak, že světelný paprskový svazek určité polarizace kostkou prochází a naopak světlo o opačné polarizaci se odráží pod předem definovaným úhlem, proto z kostky vychází finální svazek paprsků, který je součtem vstupních svazků.

Dalším typem je polopostříbřené zrcadlo. Kostka je tvořena deskami s tenkou vrstvou hliníku opět nadimenzována tak aby jedna složka paprsků procházela a druhá se odrážela.



Obr. 8.2.3.1 Polarizační kostka

#### 8.2.4 Lasorb

Hlavní úkolem zařízení zvaného lasorb je ochrana Laserové diody, která je díky svým konstrukčním vlastnostem náchylná na zničení. Lasorb je velmi rychle reagující zařízení na změny proudu a napětí a díky paralelnímu připojení k laserové diodě je schopen tyto dynamické změny tlumit. Laserové diody jsou citlivé na elektrostatické výboje(ESD).

Ve spoustě případech se podařilo prokázat, že pokud nebyl lasorb připojen, došlo ke zničení LD mnohem dříve, než byla její předpokládaná výrobcem uváděná životnost.. Jedním z důvodů jsou nárazy vzniklé při zapnutí / vypnutí zařízení obsahujících LD. Zařízení, která jsou používána standardně pro omezení špiček a nárazů jsou ovšem pro laserové diody nevhodná, jelikož pracují v jiných a to řádově vyšších rozsazích. Napětí a proudu, proto výkyvy řádech desetin a voltů nejsou schopny dokonale odfiltrovat. Bylo tedy třeba vyrobit zařízení, které je schopno pracovat v rozsahu voltů, nikoliv desítek voltů a zároveň je schopno zachytit nárazy elektrostatických výbojů, špiček a nárazů. Proto se začalo uvažovat nad absorbérem těchto rázů.

##### 8.2.4.1 Princip LASORBU

Přestože se výrobcům polovodičových laserů dařilo LD ochránit, museli designéři laserů vymýšlet často zbytečně složitá opatření, která vedla k ochraně diody. V roce 2008 přišel světový výrobce produktů pro polovodičové lasery s zařízením zvaným LASORB, jež ve svém názvu obsahuje zkratku slov LASER a ESD ABSORBER. Zařízení je revoluční v tom, že je velmi malé, proto lze paralelně připevnit přímo k patici LDa zároveň je navrhuto primárně přímo k ochraně laserové diody.

##### 8.2.4.2 Jak funguje LASORB

Zařízení hlídá a sleduje napětí mezi kontakty napájecích kolíků laserové diody. Pokud během provozu zjistí náhlou změnu napětí, po té vyvolá LASORB potlačující reakci, která okamžitě sníží napětí na laserové diodě a zbytek pohltí LASORB. Tyto změny sleduje lasorb ve velmi rychlém dynamickém tempu. Je schopen reagovat v rychlosti až 1 nanosekundu po vzniku vyššího nežádoucího napětí. Tato ochranná reakce může fungovat v období několika milisekund až po desítky milisekund, což je další jedinečnost této součástky.



*Obr. 8.2.4.2.1 Fotografie součástky lasorb*

### **8.2.5 Kolimátor**

Kolimátor je zařízení vytvářející z původně různoběžných paprsků záření úzký svazek rovnoběžně se pohybujících částic.

Optické kolimátory se skládají obvykle ze soustavy zrcadel nebo čoček. Soustředí světlo do přesně směrového svazku, který neztrácí intenzitu ani na velké vzdálenosti. Kolimátory se v tomto smyslu používají pro měření, kalibraci jiných optických zařízení a jako zaměřovače zbraní. Je to svým způsobem zařízení pracující na principu teleskopu. (Dvě čočky s rozlišnou ohniskovou vzdáleností)

### **8.3 Elektronická část laseru**

Její složení je zřejmé. Základem je bezesporu proudový zdroj, driverové desky, a desky pro ovládání stepper motorků. Veškeré komponenty musí být samozřejmě nadimenzovány na daný druh laseru.

### 8.3.1 Proudový zdroj

Jedná se o zdroj napětí a proudu, který je uzpůsoben pro napájení laserového modulu. Řídicím prvkem je proud, jelikož je potřebná proudová a výkonová stabilita například při poklesech v síti apod. z důvodu vlastností laserových diod, které byly popsány v předchozích kapitolách.

### 8.3.2 Driverová deska

Tato deska je spojena s proudovým zdrojem a řídí napájení laserového modulu a jeho ovládání (výkon, impuls, sepnutí, blankování). Podle počtu laserových modulů je v laseru umístěn ekvivalentní počet driver modulů.

### 8.3.3 Deska pro ovládání stepper motorků

Jsou v laserovém grafickém projektoru umístěny 2 ks těchto desek. Každá pro jeden z motorků (osa x,y) Tyto desky zpracovávají impulsy z ILDA převodníku a posílají signál v podobě napětí na stepper motorky, pomocí těchto motorků je laser schopen vykreslovat obrazce.

### 8.3.4 Stepper motorky

Jsou to velmi rychlé krokové motorky jež jsou vlastně speciálním druhem vícepólového synchronního motoru. Jeho použití v tomto zařízení je naprosto zřejmé. Pomocí těchto motorků jsme totiž schopni řídit nejen rychlost otáček těchto motorků, ale zároveň jejich přesnou polohu. Používají se také v přesné mechanice, regulační technice, robotice apod. Základní princip krokového motoru je, že proud procházející cívkou statoru vytvoří magnetické pole, které přitáhne opačný pól magnetu rotoru. Motor je schopný v této poloze stát a to, pokud kroutící moment vyvolaný magnetickým polem je větší než kroutící moment působící na hřídel motoru). Vhodnou kombinací zapojení cívek vznikne rotující krokové magnetické pole, které nejenže otáčí rotorem, ale zabezpečuje i jeho polohu vůči statoru. Kvůli přechodovým jevům je rychlost otáčení motoru limitovaná. Při jeho překročení motor začne ztrácet kroky.

Podle způsobu řízení krokových motorů rozeznáváme unipolární a bipolární motory. Při unipolárním řízení prochází proud v jednom okamžiku právě jednou cívkou. Výhodou je malý odběr, nevýhodou malý kroutící moment. Při bipolárním řízení prochází proud vždy dvěma protilehlými cívkami s navzájem opačně orientovanými magnetickými poli. Výhodou je větší kroutící moment, větší stabilita kroku, nevýhodou vyšší spotřeba





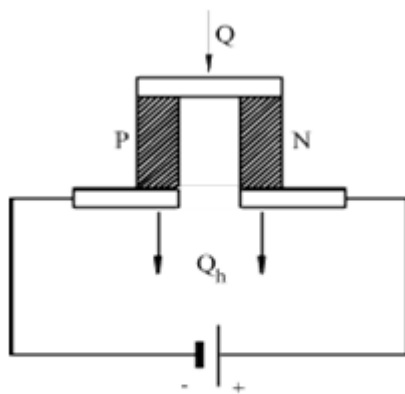
Obr. 8.3.4.1 LM stepper scanning motor používaný v laserech KVANT

### 8.3.5 Chlazení laseru

Pro chlazení celého grafického laseru je využito klasických ventilátorů pro přívod chladného vzduchu z okolí. Nicméně pro odvod tepla z optické části do prostoru okolo elektronické části je využito pomocí Peltierových článků, ty jsou navrženy podle výkonu jednotlivých laserových modulů tak, aby se stačily uchladiť ve standardním používaném prostředí.

#### 8.3.5.1 Peltierův článek

Peltierův článek se skládá ze dvou polovodičových tělísek a spojovacího můstku, které zprostředkovávají jednak přívod elektrické energie a jednak absorbují a vyzařují teplo. Základní zapojení Peltierova článku je znázorněno na 8.3.5.1.1



Obr. 8.3.5.1.1 Základní zapojení Peltierova článku

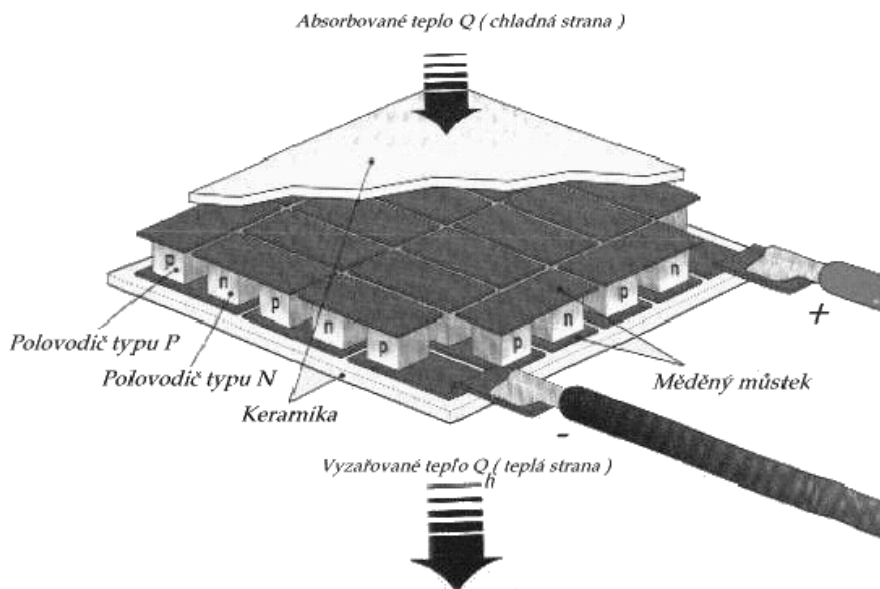
Kde –  $Q$  .... teplo absorbované

$Q_h$  ....teplo vyzařované

P.... polovodič s děrovou vodivostí

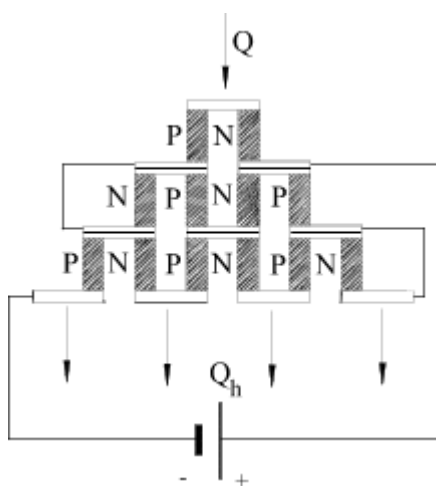
N .... polovodič s elektronovou vodivostí

Základním polovodičovým materiálem na Peltierovy články jsou převážně vizmut-telluridy, tj. termální systémy Bi-Te-Se ( N-typ ) a Bi-Sb-Te ( P-typ ). Tyto materiály mají výhodné termoelektrické vlastnosti, nízký měrný elektrický odpor a malou tepelnou vodivost. Spojovací můstky jsou zhotoveny většinou z mědi ( malý měrný elektrický odpor, možnost pájení ). Jej nevýhodou je možná difúze do polovodičového materiálu a tím zhoršení jeho vlastností. V místě styku můstku a polovodiče vzniká nežádoucí přechodový odpor, který může značně nepříznivě ovlivnit dosažitelný chladicí výkon  $Q$  článku a maximální dosažitelný teplotní rozdíl obou spojek. Nejlepší termoelektrický materiál je tedy bezcenný, nepodaří-li se najít vhodný technologický postup výroby, zajišťují nízký přechodový odpor. Jednotlivé Peltierovy články se obvykle zapojují do série ve větší celky, tzv. chladicí termobaterie viz. obr. 8.3.5.1.2. K dosažení vyšších teplotních rozdílů při zachování určitého chladicího výkonu se spojují jednotlivé termoelementy do kaskádních baterií viz. obr. 8.3.5.1.3 nebo termobaterie do kaskády. V tomto případě se musí zajistit elektrická izolace mezi termobateriemi. Jako izolace se používají keramika s dobrou tepelnou vodivostí viz obr.č. 8.3.5.1.2. V dnešní době se vyrábějí termobaterie již s touto izolací.



Obr. 8.3.5.1.2 Schéma chladicí termobaterie

Pro spojení termobaterií do kaskády je vhodné keramické destičky potřít silikonovým tukem pro zajištění malého tepelného odporu mezi bateriemi nebo baterie slepit vhodným lepidlem s dobrou tepelnou vodivostí. Kaskádní řazení termoelementů má výhodu především v dosažení vyšší chladicí účinnosti pro požadované velké teplotní rozdíly spojek. Hrubou představu o principu čerpání tepelné energie Peltierovým článkem tj. přeměně elektrické energie v tepelnou lze získat rozбором vzniku termoelektrického napětí v polovodičích typu P, resp. typu N.



Obr. 8.3.5.1.3 Schéma chladicí termobaterie – zapojení kaskáda

## 8.4 Ovládání polovodičového laseru

Pro ovládání polovodičových laserů se používají tři základní způsoby. V podstatě se lasery i díky typu ovládání řadí do cenových skupin a rozdělení kvality.

### 8.4.1 Ovládání pomocí integrovaného mikrofonu

Na základní desce laseru je integrován mikrofon, který snímá počet zvukových impulsů za minutu (Bpm). Podle rychlosti Bpm posílá integrovaný obvod analogové signály na motorky a jsou tvořeny již předem naprogramované obrazce.

### 8.4.2 Ovládání pomocí protokolu DMX

Lasery používající protokol DMX pro ovládání pohybů motorků a zapínání laserových diod jsou také v levnější kategorii, často si může uživatel vybrat mezi ovládáním pomocí integrovaného mikrofonu, popřípadě ovládáním pomocí DMX. Pokud

chce uživatel použít protokol DMX, zapne jej jednoduše zapojením konektoru vstupu a nastavením příslušné DMX adresy na zařízení. Pomocí zadání jednotlivých hodnot na vstupech zařízení ovládáme funkce laseru. Zpravidla jen měníme opět předem naprogramované sekvence.

#### 8.4.3. Ovládání pomocí ILDA převodníku

Tento způsob ovládání funkcí laseru je bezpochyby nejprofesionálnější, nejspolehlivější a nejrozšířenější u profí polovodičových laserů. Princip převodníků je dán mezinárodní směrnicí ILDA. Jde o převodník digitálního signálu z PC (většinou externí USB převodník, případně karta do PCI slotu), který pomocí 25 pinového konektoru posílá základní informace pro ovládání laseru. V jednotlivých pinech nalezneme piny pro ovládání stepper motorků, řízení jednotlivých laserových R,G,B modulů, blankování modulů. Veškeré výstupy z ILDA převodníků jsou již analogové a tím pádem musejí veškeré převodníky splňovat přesné normy. Tyto převodníky jsou schopny vytvářet již důkladnou laser show, která se programuje uživatelem, nikoliv předem nahráním programem uvnitř laseru. Tento systém používají profesionální laserové zařízení.

### 9. Laser show bezpečnost

Jedna z nejčastěji kladených otázek při tvoření laser show, popřípadě při jakékoliv jiné práci s zařízením obsahujících laser je bezpečnost. Je obecně známo, že zasažení oční sítnice koherentním zářením může mít fatální důsledky pro lidské vnímání světelných vjemů. Dále při zasažení kůže silným zářením může dojít k popáleninám. Proto se i u grafických laserů silně zabývá společnost jejich bezpečností. Z tohoto důvodu vznikla ILDA – International Laser Display Association. Ta určuje základní pravidla bezpečnosti užití laserových výrobků a jejími principy jsou jejich členové nuceni se držet. Základní pravidla jsou určena nejen pro výrobce laserů, ale také pro rental uživatele a distributory.

Pokud je výrobce, popřípadě distributor držitelem certifikátu ILDA, je to znak kvality a zároveň určité jistoty solidnosti.



Obr. 9.1 Logo ILDA

## 9.1 Základní principy bezpečnosti dle ILDA

Členové ILDA musí dodržovat tyto základní pravidla laser show:

1. Laser show musí být bezpečná pro všechny její účastníky.

A: Laserový paprsek nesmí způsobit zranění (škodlivé změny), očí nebo kůže.

B: Laserové paprsky nesmí vytvořit potenciálně poškozující stav, jako je například možnost zapálení lehce hořlavých předmětů v okolí jako jsou např. záclony.

C: Mechanické a elektrické vybavení laserového projektoru musí odpovídat všem obvyklým elektrotechnickým a mechanickým standardům a při montáži musí být vše dokonale zajištěno.

2. Za laser show nese zodpovědnost osoba, která ji poskytuje .

3. Poskytovatel laser show nesmí dovolit promítat laser show, která je nebezpečná, popřípadě potenciálně nebezpečná pro její provozovatele, ani ji nesmí jakkoliv během promítání v nebezpečnou změnit.

4. Poskytovatel nesmí ani přes nátlak okolí z jakýchkoliv důvodů udělat laser show byť potenciálně lehce nebezpečnou.

5. Průběh laser show musí být neustále monitorován a to tak, že pokud by došlo k potenciálnímu nebezpečí musí být poskytovatel schopen laser show upravit na bezpečnou během pár vteřin (vychýlením osy laser show, snížením stimulované emise, vypnutím laser show) a nebo musí být schopen laser show úplně zastavit.

A: Nejčastěji by tuto funkci monitoringu měl obsluhovat vyškolený pracovník, který ví jak přesně zasáhnout.

B. Alternativně může být použit nepřetržitý monitoring pomocí automatizovaného systému, pokud poskytuje spolehlivou, rovnocennou úroveň bezpečnosti.

C: V ojedinělých případech se nemusí o monitoring starat vyškolená osoba a to jen tehdy, nemůže-li dojít k ohrožení osob sledujících laser show, například u zadní projekce.

6. Bezpečnostní normy použití laserů se musí dodržovat i v době instalace zařízení a to platí jak pro obsluhu, tak pro diváky, popřípadě umělce spolupracující s laserovým zařízením.

A: U některých osob, jako jsou umělci, se může využít speciálního bezpečnostního opatření, jako je Deadman přepínače nebo dodatečné monitorování, aby se zajistilo, že jsou ve správné vzdálenosti a poloze, ve které jsou jim laserové paprsky bezpečné.

7. Při paprskové show musím zajistit to, aby se paprsky i při nepřesném rozložení nikdy nedostali mimo stanovenou hranici.

A: zálohy, které při detekci laserového záření odstaví laser.

B.: Elektronické omezení rozsahu pohybu X,Y zrcátek, popřípadě omezení průchodu z výstupu laseru.

C:Monitoring skenovaného prostoru s funkcí dálkového vypnutí.

8. Poskytovatel laser show prohlašuje, že v případě laserové projekce mezi osoby musí dodržovat základní bezpečnostní normy, musí je dokonale ovládat a naprosto striktně se jimi řídit. Jakékoli úmyslné skenování publika laserovými paprsky by mělo být provedeno v souladu s platnými zákony a předpisy v místě, kde se laser show koná.

B: Pokud místní zákony jinak laser show neupravují musí se počítat s obecně uznávanými expoziční limity vydané technické skupiny, jako jsou ANSI (Z136.1) nebo IEC (60825,1 60825,3).

Pro určení, zda-li je výkon laser show bezpečný pro sledování nechráněným okem nemůžeme použít obyčejný odhad. Ani standardní měřicí přístroje nejsou schopny jednoznačně prokázat, zda-li je laser show bezpečná či nikoliv (Ilda poskytuje informace pro členy o tom, jak postupovat při měření a navrhla postupy pro vytvoření bezpečné laser show.

9. Pulsní lasery by nikdy neměly být používány pro laser show pro přímé sledující diváky. Mezi ně patří Q-spínaný Nd: YAG a některé lasery s příměsí měďenky. Jedinou výjimkou užití je za velmi zvláštních podmínek a to jen po kontrole certifikovanými laserovými odborníky.

Dva příklady zvláštních podmínek:

1. Pokud se laserový projektor nachází v podstatné vzdálenost v řádu kilometrů od místa, kde je laser show sledována.

2. Puls opakovací frekvence je velmi vysoký, jako 80MHz . I za těchto zvláštních podmínek, se musí schvalování laser show povolit pouze při přítomnosti vysoce kvalifikované osoby.

10. Pokud poskytovatel neporozuměl jakémukoliv z předchozích bodů, popřípadě nechápe mezinárodní směrnice nesmí provozovat laser show.

11. Při provozování outdoorových laser show je nutno se řídit stanovami leteckého provozu. Paprsky nesmí zasahovat přistávací plochy a okolí letišť, zároveň silné paprsky nesmí mířit kolmo do vzdušného prostoru. Při použití laser projekce do oblohy je nutno tento fakt konzultovat s místním úřadem pro leteckou bezpečnost. Je to z důvodů možného klamu navigačních systémů letadel a nebo z možného nebezpečí oslnění pilotů letadel. Základní pravidla pro outdoor projekci z hlediska bezpečnosti letového provozu:

A.:Omezení toku paprsků v blízkosti letišť a letištních ploch.

B: Ukončení show při příkladném proletu vrtulníku. Hlavně nepromítat po okolních budovách v době průletu.

C: Při možném narušení letecké komunikace musí poskytovatel být schopen ihned zastavit laser show.

ILDA –oficiální prohlášení organizace

Naše poslání:

International Laser Display Association (Ilda), která byla založena v srpnu 1986, je předním světová organizace zaměřená na prosazování použití laseru v oblasti umění, zábavy a vzdělávání.

- Ilda podporuje použití laseru na mezinárodním trhu prostřednictvím ocenění programů, publikací, vývoje technologií, představením standardů a etických kodexů.
- Ilda také reprezentuje výrobní odvětví prostřednictvím odpovědí na otázky bezpečnosti a poskytuje fóra pro členy za účelem výměny nápadů, navazování partnerství a zkoumání nových technologií.
- Ilda členové mohou využít sdružení jméno a logo ve schválených formách, jak propagovat své členství jako etické, odborné společnosti, pomáhající zlepšit laser průmysl.
- Ilda pomáhá členům v oblasti obchodních vztahů. Cílem společnosti je aby se na sebe výrobci nedívali jen jako na konkurenty, ale jako na partnery.
- Komplexní spolupráce vede k rychlejšímu vývoji, než vývoj jednotlivců. Existuje mnoho dalších výhod členství.

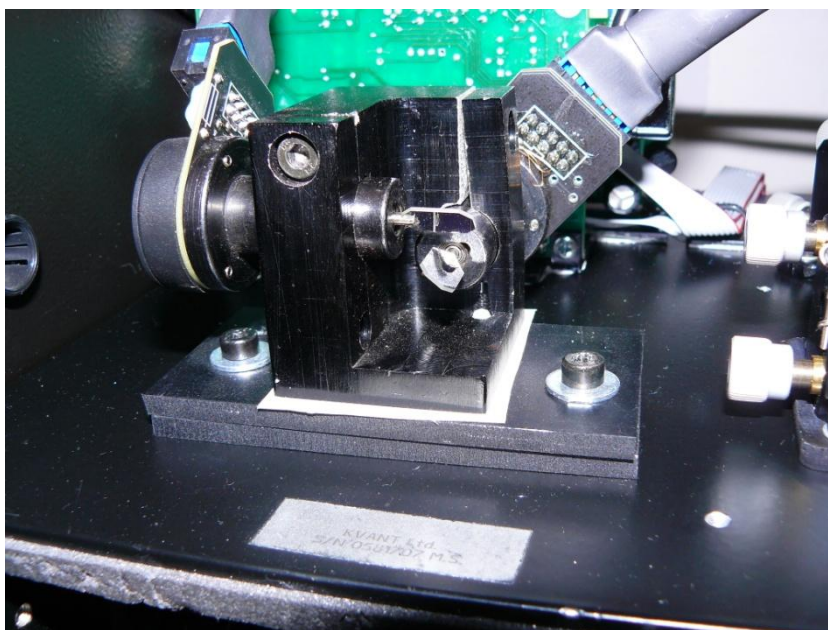
## **10. Realizace konstrukce vlastního laseru**

Pomocí znalostí, poskytnutých autorovi práce světově uznávaným výrobcem polovodičových grafických laserů společností KVANT L.t.d. je v následujících řádcích popsán upgrade funkčního 1W zeleného polovodičového laseru Maxim na 1,6W RGY laser s novým způsobem jištění stepper motorků. Celá konstrukce odpovídá popisu uvedeném v předchozí kapitole, proto budou následující řádky věnovány hlavně úpravám vytvořeným v zařízení a fotografiím funkčního zařízení. Kompletní postup prací je popsán v maximálně zjednodušeném tvaru, tak aby byly zvolené práce naprosto srozumitelné a pochopitelné. Veškeré kroky, které byly podniknuty byly důkladně konzultovány s vývojovým a servisním střediskem výrobce laserů tak, aby nedošlo k případnému zničení, či nevratnému znehodnocení laseru.

### 10.1 Nový způsob jištění stepper motorků

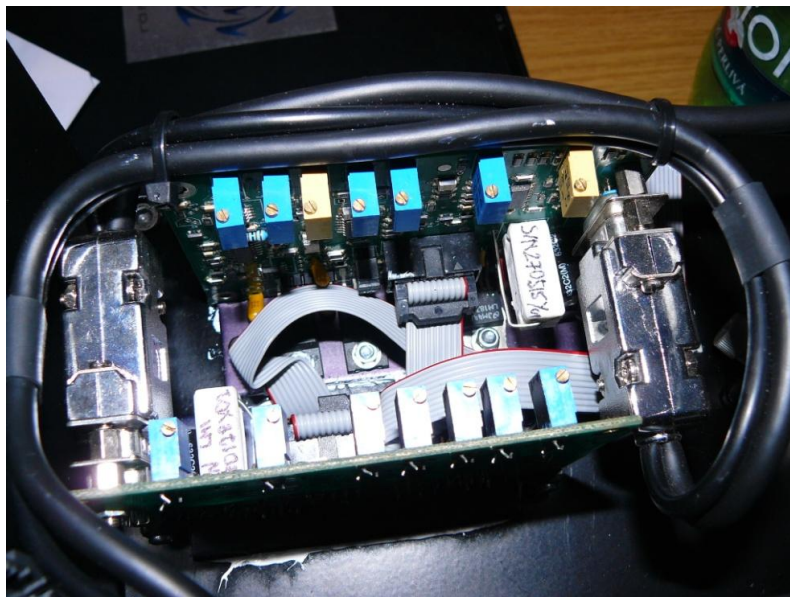
Každý polovodičový grafický laser pracující na ILDA protokolu musí mít chráněny stepper motorky proti jejich zničení, ke kterému může dojít zadáním velmi složité animace v softwaru, který je přiložen. Čím je zadané vykreslování složitější, tím rychleji musí motorky kmitat. Pokud by animace byla natolik složitá, že by hrozilo spálení stepper motorku, tak zafunguje jištění v podobě pojistky, která při překročení určitého vstupního proudu do motorku shoří a přeruší tím tok proudu do motorku.

Starší typy polovodičových grafických laserů měli tyto pojistky přímo na driverových deskách pro řízení stepper motorků. Toto řešení bylo sice funkční, nicméně v praxi se prokázalo, že při shoření pojistky bylo téměř nemožné laser nouzově opravit na místě produkce a tím pádem mohli vzniknout touringovému pracovníkovi obrovské potíže. Proto i v zařízení popsaném v následujících řádcích zvolil autor výměnu stávajících motorků za nový typ, jenž obsahuje již pojistku zapouzdřenou vedle vstupního konektoru motorku. Stávající jištění v driverové desce bylo sletováno a stalo se nefunkčním. V současné době je tedy možno přerušenou pojistku nouzově možno opravit přímo při poruše na produkci bez nutnosti složitějšího zásahu do zařízení.

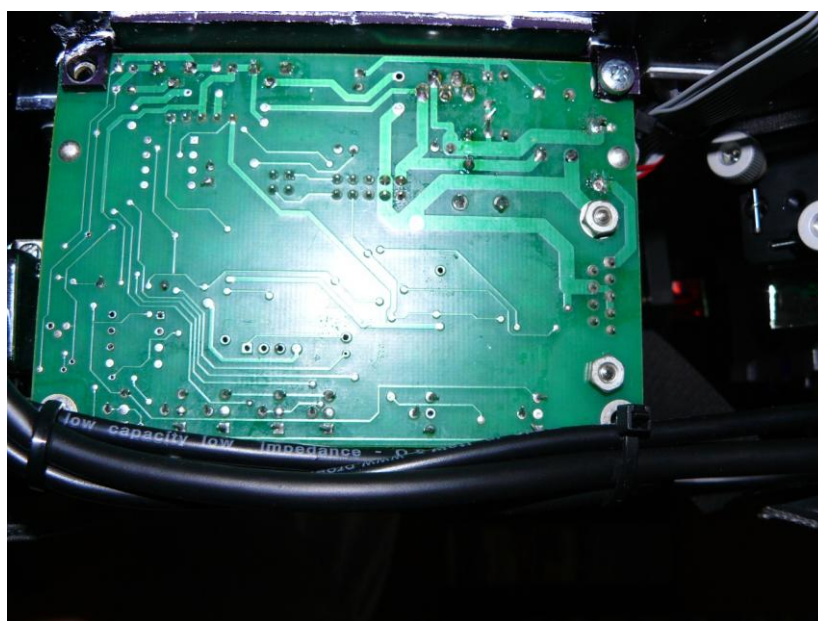


*Obr. 10.1.1 Nové stepper motorky s vlastním jištěním*





Obr. 10.1.2 Pohled na driverové desky pro řízení stepper motorků



Obr. 10.1.3 Pohled na driverovou desku pro řízení stepper motorků ze zadní strany-  
proletované jištění

### 10.1 Výměna laserového zeleného modulu za nový

Hlavní změnou zařízení byla výměna vysvícené zeleného laserového modulu a přidání nového červeného modulu a tím podstatné rozšíření funkcí grafického laseru.

Z důvodu neustálého vývoje laserových modulů se muselo při výměně zeleného modulu přistoupit k razantním mechanickým změnám upevnění modulu. Do upevňovací desky se musel vyfrézovat otvor odpovídající hloubce laserového modulu tak, aby výstup

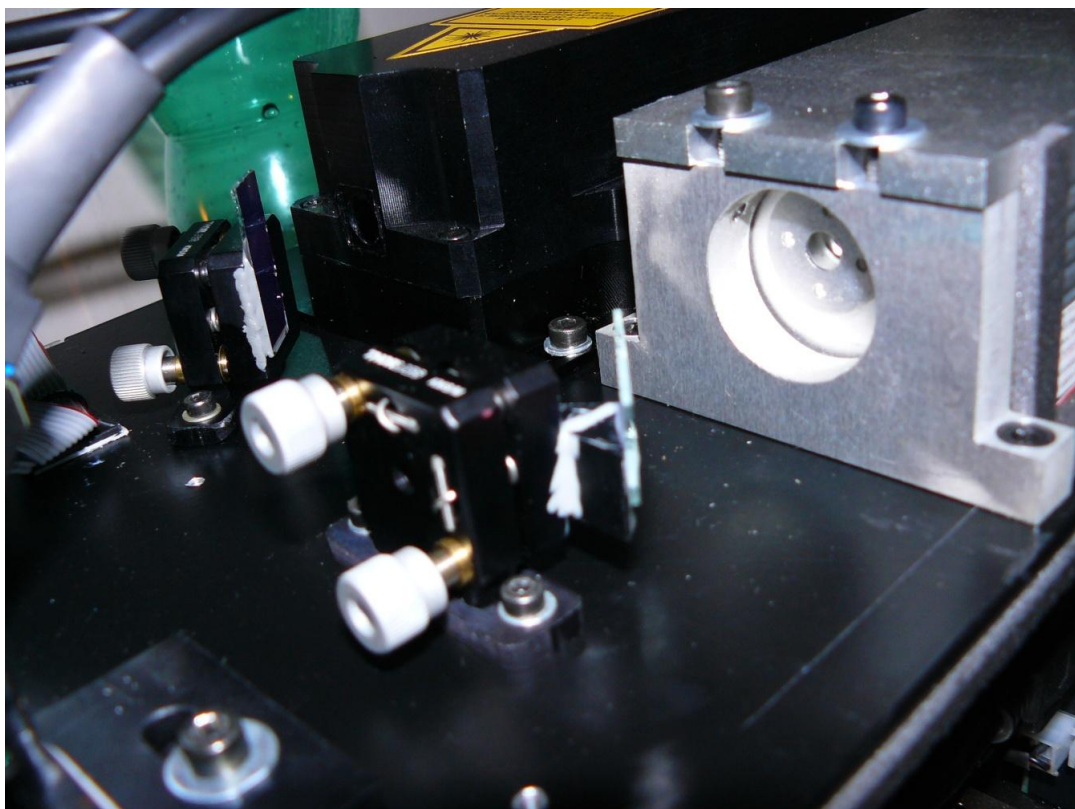
z modulu byl ve stejné vodorovné hladině s stepper motorky. Aby se dosáhlo naprosté přesnosti, musela se pod motorky umístit distanční podložka, pomocí které se dosáhlo doladění přesnosti. Po mechanické montáži modulu se muselo přistoupit k výměně driver modulu, tak aby byl plně kompatibilní s novým 1W laserovým modulem.

## **10.2 Integrace druhého laserového modulu do zařízení**

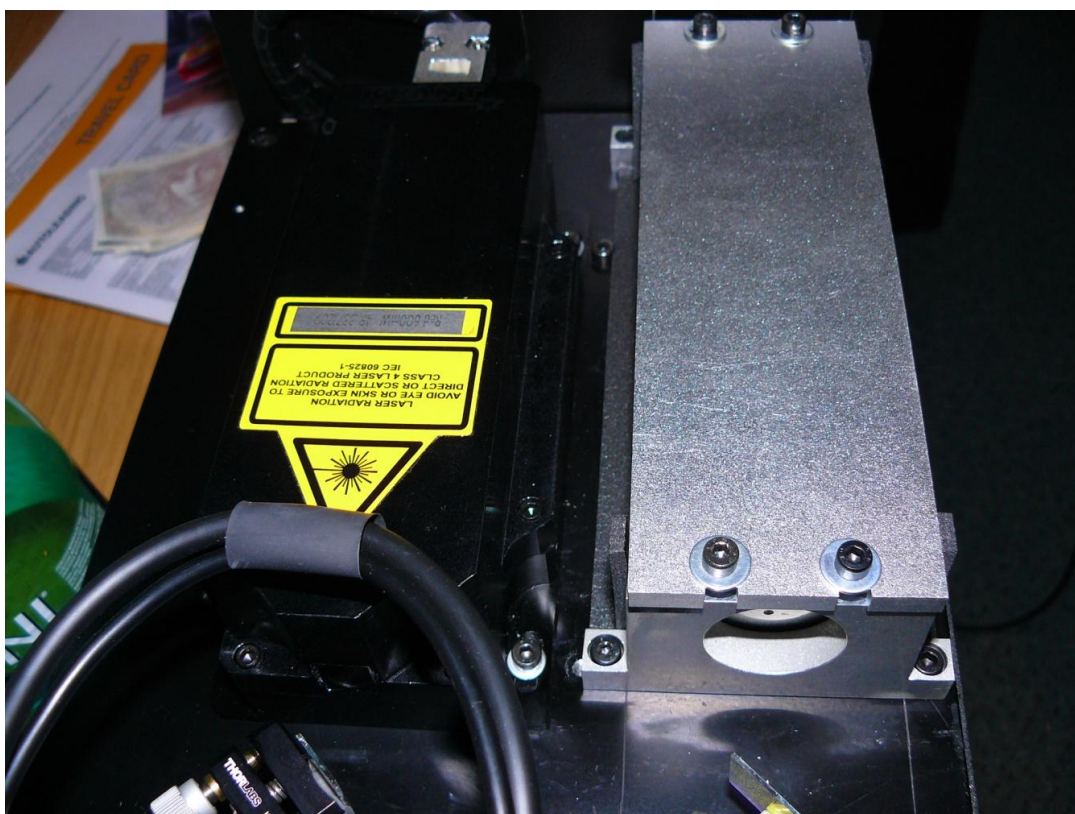
Úkolem této práce bylo vytvořit zcela funkční zařízení, tak aby splňovalo veškeré normy. Před montáží se museli vyřešit dva základní problémy. Kam umístit nový modul a jak bude vymyšleno chlazení.

Díky stávající konstrukci laseru Maxim 1W green a rozměrům laserového modulu KVANT red 0,6W se podařilo modul integrovat souběžně vedle stávajícího zeleného modulu. Muselo se přistoupit k přemístění toroidu, který převádí vstupní napájení na spodní část kovové desky laseru, místo něj se upevnil nový laserový modul. Díky znalostem nabitých u výrobce se díky dichrozrcátkům podařila projekce paprsků laseru přemístit a odrazit takovým způsobem, aby plně fungovalo míchání RGY a výsledný smíchaný paprsek byl jednotvárný. K doladění přesného toku paprsku se využívají na pérkách uložené regulátory, na které jsou upevněny dichrozrcátka. V praxi to znamená, že při rozostření toku paprsků se odmontuje kryt laseru, dichrosklíčka se vyčistí a pomocí regulátorků se manuálně doladí sbíhavost paprsků, tak, že po zanutí laseru se v softwaru nastaví bodová linka a ta se manuálně doladí utažením, nebo povolením regulátorku.

K laserovému modulu samozřejmě do upravovaného zařízení musela přibýt driverová deska pro red modul. K té bylo přivedeno napájení, z hlavní desky laseru byly přivedeny blankovací signály a tím pádem se stal modul funkčním. Montáž laserové driverové desky byla uskutečněna na spodní montážní desce podél stávající driverové desky Green modulu. V hlavním napájení laseru nebylo třeba řešit žádné podstatné změny, jelikož napájení je předimenzované.



*Obr. 10.2.1 Pohled na laserové moduly a dichrosklíčka s regulátory*



*Obr. 10.2.2 Vrchní pohled na laserové moduly*





*Obr. 10.2.3 Upevnění driverové desky pro green modul*

### 10.3 Uvedení zařízení na trh

Po kompletním odzkoušení zařízení v laboratořích a vývojovém centru společnosti Kvant se laser uvedl ke zkušebnímu provozu. Od Února 2010 je používán 2x týdně po dobu 8hodin v nepřetržitém provozu. Po měsíci používání v testovacích podmínkách se zařízení kompletně rozebralo a byly přezkoušeny jeho jednotlivé komponenty. Po lehké úpravě upevnění regulátorků dichrozrcátek mohl výrobce uznat 100% funkčnost zařízení a v současné době je upgrade zařízení nabízen všem stálým stávajícím klientům při návštěvě servisního centra výrobce. Stávající laser tak rozšířil své schopnosti o možnost vytváření barevné laser show a bez nutnosti vynaložení nákladů na nové zařízení má majitel původního laseru možnost získat plnohodnotný přístroj pro vytváření laser show s ušetřením až 60% nákladů oproti koupi nového zařízení.



Obr. 10.3.1 Fotografie odkrytovaného funkčního zařízení 1,6W RGY

## 11. Návrh prototypu plně outdoorového laseru

V současné době jsou veškeré grafické lasery společnosti Kvant konstruovány jako interiérové, popřípadě s přechodnou možností použití v exteriérových aplikacích. Proto se autor práce začal zajímat o možnost zkonstruování laseru, který by byl schopen fungovat v exteriérovém prostředí nepřetržitě a byl by schopen odolávat výkyvům počasí.

Základní myšlenkou je změna konstrukce chlazení laseru. Aktuální modely jsou řešeny tak, že elektronická část je chlazená aktivně prouděním vzduchu přes nainstalované ventilátorky a optická část – laserové moduly jsou chlazeny odvodem tepla pomocí Peltierových článků. Princip navrhované konstrukce je založen právě na chlazení pomocí Peltierových článků i v oblasti elektronické části. Obě tyto části by byly na společné montážní desce, která by byla vodotěsně uzavřena a pod ní by byla připevněna chladicí část, která by chladila i optickou i elektronickou část. Spodní část je navržena z vodotěsných ventilátorů, které by odváděly teplo z montážní desky, na kterou je přiváděno teplo, které je odváděno z optické a elektronické části pomocí Peltierových článků.

V současné době se touto myšlenkou zabývá vývojové centrum společnosti Kvant a již byl sestrojen první prototypový náčrtek případného budoucího zařízení.

## 12. Závěr

Úkolem této práce bylo seznámit čtenáře se základními vlastnostmi světla, laseru, jeho principu a možností konstrukcí. Práce se specializovala na oblast polovodičových laserů, které byly důkladně popsány. Uvedeny byly typy laserových diod a jejich možné využití. Hlavním cílem bylo osvětlit funkčnost polovodičových grafických (efektových) laserů, jejich praktické využití, konstrukci, možnosti, způsoby ovládání, jištění a standardy. Primárním autorovým úkolem bylo zhotovit plně funkční zařízení, které se dá uvést na trh a je plně funkční. Autor se proto obrátil na světově uznávaného výrobce, který osvětlil vlastní konstrukci svých zařízení a díky tomu se povedlo autorovi vylepšit stávající zařízení a pomocí nabitých znalostí spolu sestrojil nové plně funkční zařízení. V období příprav konstrukce laseru se autorovi po konzultaci s vývojovým střediskem Kvantu podařilo nalézt případnou možnost výroby plně outdoorově využitelného laseru, který by mohl být vystaven neustále exteriérovým podmínkám. Aktuálně se vývojem tohoto zařízení zabývají odborníci společnosti Kvant.

## Seznam použité literatury a jiných zdrojů

- [1] prof. Václav Černý, CSc.: odborný článek Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím.
- [2] Server [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz) – odborný článek Laserové diody.
- [3] Server [www.wikipedia.cz](http://www.wikipedia.cz) – otevřená encyklopedie na internetu
- [4] Server [www.ilda.com](http://www.ilda.com) – oficiální internetová prezentace Mezinárodní federace pro grafické lasery
- [5] Server [www.pangolin.com](http://www.pangolin.com) – oficiální internetová prezentace světového lídra ve výrobě a návrhu hardwarových a softwarových řešení pro ovládání laseru protokolem ILDA
- [6] Server [www.ilda.com](http://www.ilda.com) – oficiální internetová prezentace Mezinárodní federace pro grafické lasery
- [7] Kvant Ltd. – vnitropodniková - výrobní a vývojová dokumentace profesionálního a certifikovaného výrobce grafických polovodičových laserů
- [8] EMMELMANN, C.: Introduction to industrial laser materials processing. ROFIN-SINAR. Hamburg, Ferrary 1997
- [9] Bc. Ondřej Tureček – Bakalářská práce – Inteligentní osvětlení